

**Análisis Multitemporal De La Calidad Del Agua En Relación Con La Cobertura De
La Tierra En La Subcuenca Media-Baja Del Río Teusacá**

**IVON NATALIA BLANCO MONTEALEGRE
NATALIA ANDREA MARTÍNEZ BARÓN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2023
**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA EN RELACIÓN
CON LA COBERTURA DE LA TIERRA EN LA SUBCUENCA MEDIA-BAJA
DEL RÍO TEUSACÁ**

**IVON NATALIA BLANCO MONTEALEGRE
NATALIA ANDREA MARTÍNEZ BARÓN**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Ambiental e Ingeniera
Civil**

**Directora
PhD. ANGELA MARIA JARAMILLO LONDOÑO**

**Co- directora
MsC. ING. DAYAM SORET CALDERÓN RIVERA**

**Co- director
ING. FABIO DIAZ**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2023**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2 OBJETIVOS	6
2.1 OBJETIVO GENERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 ANTECEDENTES.....	7
4 MARCO TEÓRICO	13
1. METODOLOGÍA	21
5.1 Localización y descripción de la zona de estudio	21
5.2 Recolección de información	23
5.3 Procesamiento de información	23
2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
6.1 Análisis multitemporal del índice de calidad del agua (ICA)	31
2.3 Análisis del cambio de la cobertura	53
2.3.1 Tasa de cambio de cobertura natural (TCCN)	53
6.4 Análisis de la tendencia de la calidad del agua y el cambio de las coberturas de la tierra	57
6.5 Análisis de información primaria obtenida de encuesta estructurada	63
6.6 Propuesta de plan de acción para mejora en la calidad del agua de la subcuenca del río Teusacá	66
3. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO	70
4. CONCLUSIONES	71
5. RECOMENDACIONES	73
6. REFERENCIAS	74
7. ANEXOS	80

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2001.	78
ANEXO 2. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2006.	79
ANEXO 3. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2011. Fuente: Elaboración propia	80
ANEXO 4. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2016. Fuente: Elaboración propia	81
ANEXO 5. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2020. Fuente: Elaboración propio	82
ANEXO 6. Registro fotográfico de las coberturas de La Calera y Sopó	83
ANEXO 7. Propuestas de los residentes de Sopó y La Calera	85

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Modelo de metodología Corine Land Cover (CLC)	26
Ilustración 2. Localización de la Subcuenca del Río Teusacá	27
Ilustración 3. Localización de las estaciones de monitoreo de calidad del agua en la Subcuenca del Río Teusacá	33

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros por indicador de calidad del agua.....	9
Tabla 2 Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA	16
Tabla 3 Variables y ponderación para el caso de 5 variables en el cálculo del Indicador ICA	17
Tabla 4 Clasificación de la tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra.....	18
Tabla 5 Clasificación de la cobertura vegetal natural.....	19

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Cambio multitemporal del ICA Fuente: Elaboración propia	41
Gráfica 2. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2001	44
Gráfica 3. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2006	46
Gráfica 4. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2011 Fuente: Elaboración propia	49
Gráfica 5. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2016	51
Gráfica 6. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2020	54
Gráfica 7. Tasa de cambio de cobertura natural (TCCN)	57
Gráfica 8. Relación de cambios de la cobertura vegetal y calidad del agua	59

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Índice de calidad del agua (ICA)	23
Ecuación 2. Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra	24
Ecuación 3. Indicador de vegetación remanente	25
Ecuación 4. Corrección radiométrica	30

RESUMEN

La subcuenca del río Teusacá cuenta con un área total de 35818,42 hectáreas y un cauce principal de 69 km, se encuentra al este de los Cerros Orientales de Bogotá y en la zona centro oriental del río Bogotá. En esta subcuenca, también se ubican las áreas rurales de los municipios La Calera, Sopó, Chía, Bogotá, Choachí, Guasca, Tocancipá y Ubaque. El relieve es montañoso, con temperatura media de 12°C y una precipitación media de 750 mm, lo cual favorece a que allí exista una gran diversidad de especies de fauna y flora. (Corporación Autónoma Regional, 2021).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la relación existente entre la calidad del agua con los cambios en la dinámica de la cobertura del suelo de la subcuenca media-baja del río Teusacá para los años 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020. Esto debido a la preocupación en la calidad del agua que consumen los habitantes de los municipios de La Calera y Sopó quienes aprovechan el recurso hídrico por medio del desarrollo de actividades económicas como lo son; las industrias, cultivos de flores, la ganadería y para satisfacer otras necesidades básicas en sus hogares. Inicialmente se llevó a cabo una investigación donde se identificó la ubicación de la zona de estudio, junto con sus características ambientales, sociales y económicas. Seguido a esto se solicitaron a la CAR Cundinamarca los datos multitemporales de la calidad del agua del río Teusacá para los años seleccionados, para después buscar las imágenes satelitales tipo Landsat del área de estudio. Por último, se hicieron visitas de campo en ambos municipios, para hacer un registro de las coberturas presentes y para conocer la percepción de los habitantes con respecto a los cambios en el recurso hídrico y del suelo, por medio de una encuesta formulada. Se realizaron los modelos cartográficos, donde se clasificaron los tipos de coberturas del suelo presentes en el área, por medio de la metodología Corine Land Cover, en donde se identificaron las coberturas arbustal, herbazal, pastos limpios, mosaico de pastos y cultivos, tejido urbano continuo y cuerpos de agua superficiales. Además, se procedió a calcular el Índice de Calidad del Agua (ICA), el Indicador de

Vegetación Remanente (IVR) y la Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN).

Al hacer la relación entre los cambios en las coberturas de la tierra y la calidad del agua en la subcuenca, se logró identificar qué factores como las pérdidas de los arbustales y el aumento en el tejido urbano, si tienen afectación en la calidad del cuerpo hídrico. Con esto finalmente se propuso un plan de acción para mejorar la calidad tanto del recurso del agua como del suelo.

Palabras clave: Cuenca hidrográfica, río, calidad del agua, cobertura de la tierra, análisis multitemporal.

ABSTRACT

The Teusacá River sub-basin has a total area of 35,818.42 hectares and a main channel of 69 km, located east of the Eastern Hills of Bogotá and in the central-eastern area of the Bogotá River. This sub-basin also includes the rural areas of the municipalities of La Calera, Sopó, Chía, Bogotá, Choachí, Guasca, Tocancipá, and Ubaque. Mountainous relief, with an average temperature of 12°C and an average precipitation of 750 mm, which favors a great diversity of flora and fauna, characterizes the area. (Corporación Autónoma Regional, 2021).

The purpose of this study is to analyze the relationship between water quality and changes in land cover dynamics in the lower-middle sub-basin of the Teusacá River for the years 2001, 2006, 2011, 2016, and 2020. This is due to concerns about the quality of water consumed by the inhabitants of the municipalities of La Calera and Sopó, who use the water resource for economic activities such as industries, flower crops, livestock, and basic household needs. Initially, an investigation was carried out to identify the location of the study area, along with its environmental, social, and economic characteristics. Subsequently, multi-temporal data on water quality of the Teusacá River for the selected years were requested from CAR Cundinamarca, followed by the search for Landsat satellite images of the study area. Finally, field visits were made in both municipalities to record the present land cover and to understand the perception of the inhabitants regarding changes in the water and land resources through a formulated survey.

Cartographic models were created to classify the land cover types present in the area using the Corine Land Cover methodology, where shrubland, herbaceous cover, clean pastures, mosaic of pastures and crops, continuous urban fabric, and surface water bodies were identified. In addition, the Water Quality Index (WQI), the Remnant Vegetation Index (RVI), and the Rate of Change of Natural Land Cover (RCNLC) were calculated. By relating changes in land cover and water quality in the sub-basin, it was identified that factors such as the loss of shrublands and the increase in urban fabric have an impact on water quality.

Finally, an action plan was proposed to improve the quality of both water and soil resources.

Keywords: watershed, river, water quality, land cover, multitemporal analysi

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida y el desarrollo sostenible de las comunidades humanas y los ecosistemas. La calidad del agua, es decir, su composición química, física y biológica, juega un papel fundamental en la salud humana y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. La degradación de la calidad del agua es un problema ambiental de preocupación global, y su estudio es crucial para comprender y abordar los impactos del cambio ambiental y las actividades humanas en este (Omnium, 2018).

Ahora bien, los cambios en las coberturas que constituyen a las cuencas hidrográficas, como la pérdida de capa vegetal, generan una disminución de su capacidad de infiltración, ocasionando impactos negativos en la disponibilidad del recurso, como también se puede presentar un cambio en la calidad y cantidad de agua disponible en la cuenca (Barrera & Chaparro, 2021).

La subcuenca media-baja del río Teusacá se encuentra conformada por los municipios de La Calera y Sopó, quienes aprovechan el recurso hídrico por medio del desarrollo de actividades económicas como lo son; las industrias, cultivos y la ganadería. Además de esto, el agua de la subcuenca es aprovechada para usos domésticos y para satisfacer otras necesidades básicas de las poblaciones.

Por otra parte, entre los usos actuales del suelo en la subcuenca del río Teusacá se destacan las actividades de uso forestal, uso agrícola, uso pecuario, uso urbano o de infraestructura, como también para el uso de embalses o cuerpos de agua artificiales. El constante desarrollo de estas actividades a lo largo del tiempo presenta un aporte significativo en la afectación de la calidad del agua del río, al mismo tiempo que en la variación de las áreas ocupadas por los tipos de coberturas presentes en la zona

Principalmente el objetivo de este proyecto es realizar un análisis multitemporal de la calidad del agua en la subcuenca media-baja del río Teusacá, con el fin de evaluar la influencia de los cambios en la cobertura de la tierra en la calidad del agua para los años 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020.

Los resultados proporcionaron información valiosa para entender la relación entre la calidad del agua y la cobertura de la tierra en la subcuenca del río Teusacá, al mismo tiempo que el aporte hecho por la comunidad por medio de las encuestas estructuradas, en donde se logró tener mayor claridad del panorama de la subcuenca a través de los años. Lo anterior permitió realizar el plan de acción propuesto, lo que puede contribuir a la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas de gestión adecuadas para proteger y conservar los recursos hídricos en esta región.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la relación entre los parámetros físico-químicos de la calidad de agua con la dinámica de la cobertura vegetal a lo largo de la parte media-baja de la subcuenca del río Teusacá, para los años 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el registro histórico de la calidad del agua y del comportamiento físicoquímico del río, con el fin de determinar los factores que inciden en los cambios presentados en la subcuenca del río Teusacá.
- Procesar las imágenes satelitales asociadas a la parte media- baja de la subcuenca del río Teusacá para obtener información de las coberturas de la tierra para los diferentes años de estudio.
- Reconocer los factores que influyen en la calidad del agua en relación con la cobertura vegetal de la zona de estudio, por medio del contraste de los indicadores como el Índice de Calidad del Agua (ICA), Indicador de Vegetación Remanente (IVR) y la Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN), con el propósito de realizar el análisis multitemporal de la subcuenca.

3 ANTECEDENTES

La evaluación de la calidad del agua desempeña un papel crucial en la determinación del estado de conservación de las cuencas hidrográficas, con el objetivo de prevenir enfermedades y evitar perturbaciones en los ecosistemas. Para la determinación de la calidad del agua se consideran factores fisicoquímicos y biológicos que son parte fundamental de la toma de decisiones y la gestión del recurso hídrico para así optimizar el bienestar económico y social, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales ("Minambiente", 2021). Para llevar a cabo la determinación de la calidad del agua se han desarrollado una serie de metodologías que tienen como objetivo identificar las características positivas y negativas por medio de una expresión numérica para cualquier fuente de agua.

En Alemania desde los años 60's Hortón y Liebman fueron los primeros en generar una metodología para el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA). En 1970 Brown desarrolló el índice general de la calidad del agua. En 1972, Dinius formuló un ICA compuesto por dos variables microbiológicas y nueve variables fisicoquímicas, enfocado principalmente a la industria, agricultura, pesca y recreación. Por otro lado, se planteó un ICA conformado por un elemento biótico, en este caso los coliformes fecales y ocho variables fisicoquímicas, este se conoce como ICA-INSF que es principalmente implementado en las agencias de los Estados Unidos, enfocado principalmente a la calidad del agua para consumo humano. Estos índices permiten correlacionar las actividades desarrolladas en el área de influencia con las mediciones de los parámetros físicos, químicos y biológicos del cuerpo hídrico (Martínez & Barrero, 2018).

En Europa, se desarrolló el UWQI- Índice universal de la calidad del agua implementado principalmente para evaluar la calidad del agua superficial como fuente de agua potable, se tienen en cuenta doce variables fisicoquímicas y biológicas como coliformes fecales, pH, DBO5, nitratos, cadmio, entre otros (Martínez & Barrero, 2018).

Por otra parte, algunas instituciones de Corea del Sur han realizado investigaciones y monitoreos para correlacionar las variaciones en los usos del suelo y la calidad del agua de los cuerpos hídricos. Para el estudio de la cuenca del río se analizaron parámetros de calidad de agua como iones metálicos, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO), niveles de NH₃, NO₃ y PO₄, junto con los diferentes tipos de suelo que allí se encuentran como bosques, pastizales, áreas agrícolas, ganaderas y residenciales. Los resultados finales demostraron que los principales componentes que afectan la calidad del agua son los iones metálicos, la DBO, DQO, PO₄ y los sólidos suspendidos totales (J.Y. Lee et al, 2010).

En Latinoamérica, más exactamente en Chile en 1991 fueron desarrollados el ICA-extendido y el ICA-simplificado en donde se tiene en cuenta el tamaño del cuerpo hídrico para así tener menores costos de análisis, más adelante en Brasil se adaptó la metodología ICA-NFS para ser aplicado en condiciones de trópico, se implementa principalmente para verificar la calidad del agua para consumo humano y en ocasiones para fines de protección y conservación. Como se ha observado se han tomado las metodologías anteriormente descritas e incluso se han fusionado, como en el caso de Perú quien implementó la metodología de Cuba junto con el indicador ICA-NFS, en donde se incluyen el nitrógeno amoniacal y cloruros.

En Colombia, a partir del año 2002 se ha realizado el monitoreo de la calidad del agua por parte del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), teniendo en cuenta las metodologías desarrolladas por Behar (1997), Ramírez y Viña (1998) quienes desarrollaron catorce indicadores en los que se encuentran tres correspondientes a la oferta hídrica, dos a la sostenibilidad del recurso, seis a la calidad del agua dulce y tres para las aguas marinas y costeras.

En la Tabla 1.se presentan los diferentes tipos de indicadores usados alrededor del mundo para determinar la calidad del agua junto con los parámetros establecidos para el cálculo de estos.

Tabla 1 Parámetros por indicador de calidad del agua

Parámetros	Indices					
	ICA-NFS	UWQI	ICA-SIMPLIFICADO	ICA-EXTENDIDO	ICA-NCA	ICA
Oxígeno disuelto	x	x			x	x
Coliformes fecales	x	x	x	x	x	x
pH	x	x		x	x	x
DBO5	x	x	x	x	x	x
Nitrógeno total		x				
Nitratos	x				x	
Nitritos					x	
Fósforo total		x				
Fosfatos	x				x	
Temperatura	x	x				x
Turbiedad	x					
Sólidos totales	x					
Sólidos disueltos totales		x		x		
Sólidos suspendidos totales		x		x	x	x
Temperatura						
Conductividad eléctrica		x				
Metales pesados		x				
Pesticidas y otros contaminantes químicos		x				
Amoniaco					x	
Cloruros					x	

Fuente: Elaboración propia

Además, se ha encontrado que la calidad del agua se puede relacionar con la dinámica de la cobertura vegetal del sitio de estudio. La función de los bosques es fundamental para el abastecimiento de agua de calidad, ya que contribuyen a la estabilización y protección de los suelos frente a la erosión. La mayoría de las cuencas hidrográficas que suministran agua dulce a nivel mundial se encuentran en zonas boscosas, y éstas desempeñan un papel clave en la protección de embalses y presas contra la acumulación de sedimentos. Asimismo, los bosques actúan como filtros naturales que protegen las aguas subterráneas de la contaminación mediante la labor filtrante del suelo forestal (Blanco, 2017).

La cobertura vegetal fue el principal motivo de investigación al hablar de la evaluación y manejo de recursos naturales. Con el lanzamiento del satélite LANDSAT en el año 1972 se dio inicio a la evaluación y monitoreo del estado de la vegetación por medio de imágenes satelitales multitemporales. Con ayuda de estas imágenes y la extracción de la información proporcionada, se desarrollan

una serie de índices para determinar la dinámica de la cobertura vegetal con el tiempo, dentro de los índices encontramos la Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN), el Indicador de Vegetación Remanente (IVR) y por último el Índice de Fragmentación (IF).

Por otro lado, en las últimas décadas se ha observado un creciente interés en el estudio de las transformaciones en el uso del suelo en Colombia, analizando su dinámica de cambio. Este enfoque se debe a la preocupación por los posibles impactos del cambio global, la conservación de la biodiversidad, el funcionamiento de los ecosistemas y otros temas relacionados.

En un estudio realizado en el departamento de Antioquia, Colombia, se ha demostrado la relación que se tiene entre la cobertura vegetal y el agua, en donde se reconoce la importancia de los bosques en la regulación del caudal, ya que desempeñan un papel fundamental en el control del nivel freático y facilitan la recarga de los acuíferos que alimentan el flujo constante de los cursos de agua. Además, los bosques reducen la cantidad de pérdidas ocasionadas por la escorrentía directa de la superficie y retardan la evacuación inmediata de las precipitaciones. (Villegas, 2004).

En el año 2018 se realizó una investigación en el Humedal Resbalón en donde se encontró que las condiciones fisicoquímicas del agua en el humedal cumplen con los estándares de calidad establecidos para agua dulce y son adecuadas para la conservación y preservación de la flora y fauna del área. Sin embargo, también encontraron que existen algunas áreas en las que la calidad del agua se ve afectada por factores antropogénicos, como la presencia de residuos sólidos y la descarga de aguas residuales. Los autores sugieren que es necesario implementar medidas de gestión adecuadas para abordar estos problemas y mejorar aún más la calidad del agua en el humedal. También destacan la importancia de la conservación y preservación de los humedales como ecosistemas críticos para la biodiversidad y la calidad del agua en la región (Londoño et al., 2018).

En el año 2020, para un estudio llevado a cabo en una pequeña cuenca ubicada en la Amazonía, en este se realizó el mismo tipo de análisis aplicado en el departamento de Antioquia, en donde se relacionaron los parámetros de calidad de agua y los usos del suelo en la cuenca de Prata. Todo con el fin de evaluar el potencial de contaminación por escorrentía superficial, teniendo en cuenta las variaciones en la estacionalidad. Los resultados obtenidos son de utilidad para realizar a futuro una mejora en la gestión del recurso hídrico y las coberturas en la zona (da Silva et al.,2020).

En el año 2021, se realizó un estudio en la subcuenca del río Chicú, Colombia, donde se examinó la relación entre la cobertura vegetal y la calidad del agua por medio del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y los diferentes mapas LUCC (Land use and cover change) obtenidos mediante teledetección utilizando Landsat. Los resultados indican que la cobertura vegetal tiene un efecto significativo en la calidad del agua en la cuenca de estudio. Los autores encontraron que la cobertura vegetal tenía una influencia positiva en la calidad del agua, reduciendo la cantidad de sedimentos y nutrientes transportados por el agua. Los resultados también sugieren que la relación entre la cobertura vegetal y la calidad del agua es no lineal y que hay un punto óptimo de cobertura vegetal a partir del cual la calidad del agua mejora. Por otro lado, destacan la importancia de la gestión de la cobertura vegetal como una herramienta efectiva para mejorar la calidad del agua en las cuencas hidrográficas (Barreto-Martin et al., 2021).

A finales del siglo XIX, los bosques de la cuenca del río Teusacá sufrieron una transformación en su paisaje debido a la construcción de viviendas en las zonas aledañas a la cuenca. Con el paso de los años y el aumento de la población se intensificó la deforestación en la zona. A mediados de los años 60's, se dio inicio a la reforestación de la subcuenca, sin embargo, las especies plantadas no eran nativas por lo que esto generó un cambio en el cauce y en la calidad de la oferta hídrica de la subcuenca (Garay, 2019).

Además de esto, la relación entre los cambios en los usos del suelo de un efluente y su calidad hídrica ha sido utilizada en diferentes estudios a nivel global.

Finalmente, el monitoreo del cambio en la dinámica de la cobertura vegetal del sitio de estudio es un importante instrumento para la formulación y evaluación de planes de manejo a las cuencas hidrográficas para así generar un uso sostenible del territorio.

4 MARCO TEÓRICO

Cuenca Hidrográfica

De acuerdo con la disposición 1729 de 2002, una cuenca hidrográfica se describe como un territorio que comprende tanto aguas superficiales como subterráneas. Estas aguas fluyen hacia una red natural que incluye uno o varios cursos de agua, los cuales pueden tener un flujo constante o intermitente. Estos cursos de agua, a su vez, se unen en un curso mayor, que puede desembocar en un río principal, un cuerpo de agua natural, un embalse, o directamente en el mar (Ramirez, 2013).

La cuenca hidrográfica es un sistema natural en constante evolución que integra elementos físicos, biológicos, socioeconómicos, institucionales y políticos interrelacionados. Este sistema único e indivisible desempeña un papel crucial en el desarrollo socioeconómico.

La Gestión Integral del Recurso Hídrico reconoce a la cuenca hidrográfica como la unidad primordial para analizar y llevar a cabo procesos de planificación y administración. (Martínez & Barrero, 2018).

Cobertura de la tierra

La "cobertura" de la tierra hace referencia a la cobertura biofísica que se aprecia en la superficie terrestre, lo cual incluye no solo la vegetación y los elementos creados por el hombre, sino también otras superficies terrestres como cuerpos de agua y afloramientos rocosos.

Según el IDEAM (1997), la cobertura se define como una unidad delimitable que se establece a partir del análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisonómicas y ambientales, que son diferenciables respecto a la unidad inmediata.

Para lograr una clasificación estándar, desde el 2004 se ha utilizado la metodología y leyenda de coberturas terrestres de Colombia, la cual se basa en la metodología Corine Land Cover (CLC), con el objetivo de homogeneizar las

distintas metodologías y leyendas de cobertura terrestre que se han utilizado hasta la fecha. Todo ello permite establecer un sistema de monitoreo que produce información actualizada, precisa y rastreada, ya que la gran variabilidad de sistemas de clasificación previos no permitía esto (IDEAM, 2012).

- **Herbazal**

La cobertura herbazal consiste en la presencia y distribución de pastos, hierbas y otras plantas herbáceas que cubren el suelo, formando una capa vegetal de altura relativamente baja. Esta puede variar en términos de composición de especies y densidad de vegetación, desde áreas con una cobertura herbácea dispersa hasta aquellas con una cobertura densa y continua. Una hierba se caracteriza por ser una planta no lignificada o apenas lignificada, lo que le confiere una consistencia suave en todos sus órganos, tanto subterráneos como sobre el suelo (Quiroz, 2010).

- **Arbustal**

La cobertura arbustal abarca las áreas ocupadas por vegetación de arbustos que se desarrollan de forma natural en diversas densidades y tipos de sustratos. Los arbustos son plantas perennes con tallos leñosos, con alturas que oscilan entre 0,5 y 5 metros. Estas plantas presentan una ramificación densa en la base y no poseen una copa claramente definida (Quiroz, 2010).

- **Pastos limpios**

Se trata de terrenos donde la principal vegetación presente en estas áreas consiste en pastizales destinados al consumo animal. Estas tierras se utilizan únicamente para la realización de actividades ganaderas, donde se crían animales domésticos con el propósito de obtener productos (CORNARE, 2023).

- **Mosaico de pastos y cultivos**

Incluye las áreas que están ocupadas por pastos y cultivos, donde el tamaño de las parcelas es bastante reducido (menor a 25 hectáreas) y la disposición de los lotes es tan compleja que resulta difícil representarlos individualmente en un mapa. La cobertura puede presentar patrones geométricos distintivos que facilitan su comprensión, además de una amplia variedad de tonos y colores debido a las diversas etapas de crecimiento vegetativo y las prácticas de manejo aplicadas (Quiroz, 2010).

- **Tejido urbano continuo**

La cobertura de tejido urbano se refiere a la proporción o extensión de áreas urbanizadas, construidas o desarrolladas en un entorno urbano. Consiste en la presencia y distribución de edificaciones, infraestructuras y elementos urbanos como calles, carreteras, plazas, parques, entre otros dentro del área de interés (Quiroz, 2010).

- **Cuerpos de agua artificiales**

Esta comprende los cuerpos de agua que han sido creados por el ser humano con el objetivo principal de almacenar agua, comúnmente para la generación de electricidad y el suministro de agua potable. Sin embargo, también se utilizan para otros propósitos como el control de caudales, prevención de inundaciones, riego agrícola, así como para actividades turísticas y recreativas (Quiroz, 2010).

Calidad del agua

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se entiende por calidad del agua a las condiciones necesarias para mantener un ecosistema equilibrado y cumplir con objetivos específicos de calidad. La calidad del agua se determina a través de sus características físicas, químicas, biológicas y ecológicas. (Minambiente, 2021).

Existen diversos parámetros que se emplean para evaluar la calidad del agua, entre ellos se encuentran el nivel de oxígeno disuelto, la presencia de bacterias, la salinidad y la cantidad de sólidos suspendidos (turbidez). En ciertos cuerpos de agua, también se analizan las concentraciones de algas microscópicas, así como la presencia de pesticidas, herbicidas, metales pesados y otros contaminantes, con el fin de determinar su calidad. (Florida Keys National Marine Sanctuary, 2022).

Índices de calidad del agua

Para Colombia, se creó un conjunto de medidas hídricas con el objetivo de responder a las preguntas relacionadas con la disponibilidad del recurso y las limitaciones derivadas de los efectos en la oferta o la calidad del agua. Estos

índices están asociados al régimen natural (Índice de Aridez - IA, Índice de Regulación Hídrica - IRH) y a la intervención antrópica (Índice de Uso del Agua - IUA, Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento- IVH, Índice de Amenaza Potencial por Afectación a la Calidad del Agua - IACAL e Índice de Calidad del Agua - ICA) (IDEAM, 2021).

Índice de Calidad del Agua – ICA

La evaluación de la calidad del agua de un curso de agua superficial se lleva a cabo mediante la asignación de un valor numérico a una de las cinco categorías disponibles, basado en mediciones tomadas para cinco o seis variables en una estación de monitoreo durante un período de tiempo. En la Red Básica de Monitoreo de la Calidad del Agua, se han medido estas variables en 150 estaciones en cuatro ocasiones durante el año, una vez cada tres meses (IDEAM, 2021). La ecuación utilizada se expresa de la siguiente forma:

$$ICA_{njt} = \left[\sum_{i=1}^B Wi * I_i \right]$$

Ecuación 1 Índice de calidad del agua (ICA)

En donde:

ICA_{njt} : Es el índice de calidad del agua de la fuente de agua en la estación de monitoreo de la calidad del agua j , en un tiempo t y en base a n variables.

Wi : Es el porcentaje o ponderado asignado a la variable i .

I_i : Es el subíndice del parámetro i .

En la siguiente tabla se registran los rangos de los valores obtenidos con su respectiva calificación:

Tabla 2 Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA

Categoría de valores	Calificación de la calidad del agua	Color
0,00 - 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 - 0,50	Mala	Naranja
0,51 - 0,70	Regular	Amarillo

0,71 - 0,90	Aceptable	Verde
0,91 - 1,00	Buena	Azul

Fuente: IDEAM, 2022.

El ponderador asignado por IDEAM de acuerdo con el cálculo del indicador en el que se emplean 5 variables se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3 Variables y ponderación para el caso de 5 variables en el cálculo del Indicador ICA

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD.	% de saturación	0,2
Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/l	0,2
Demanda química de oxígeno, DQO.	mg/l	0,2
Conductividad eléctrica, C.E.	μS/cm	0,2
pH	Unidades de pH	0,2

Fuente: IDEAM, 2013.

Índices de cobertura vegetal

Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN)

Es un indicador utilizado para medir los cambios en la cobertura vegetal natural del suelo a través de un estudio multitemporal de al menos 10 años. Este indicador estima la degradación o conservación de la cobertura vegetal, y proporciona información sobre el grado de conservación de la cobertura, la cantidad de hábitat natural intacto y los patrones de conversión (Minambiente, 2018). La ecuación utilizada para calcular la TCCN se expresa de la siguiente manera:

$$TCCN: \frac{\ln(ATC_2 - ATC_1) * 100}{(t_2 - t_1)}$$

Ecuación 2 Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra

En donde:

TCCN: Es el indicador de las tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra.

ATC₂: Es el área de la cobertura en el momento final (año final del estudio multitemporal).

ATC: Es el área de la cobertura en el momento inicial (año inicial del estudio multitemporal).

t₂: Es el tiempo final del estudio (año).

t₁: Es el año inicial del estudio (año).

El resultado de este índice está expresado en porcentaje (%) y se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 4 Clasificación de la tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra

Porcentaje	Clasificación
0 a 10%	Baja
Entre 11 y 20%	Media
Entre 21 % y 30 %	Medianamente alta
Entre 31 % y 40 %	Alta
Mayor a 40%	Muy alto

Fuente: Arevalo & Duarte, 2021.

Indicador de Vegetación Remanente (IVR)

Este índice se utiliza para representar como un porcentaje total la cobertura vegetal natural de un área específica. Para calcular este índice, es necesario realizar el cálculo por cada una de las coberturas vegetales presentes en la zona de estudio (Minambiente, 2018). La ecuación correspondiente a este indicador se expresa de la siguiente manera:

$$IVR = \left(\frac{AVR}{At} \right) * 100$$

Ecuación 3 Indicador de vegetación remanente

En donde:

AVR: Es el área de vegetación remanente.

At: Es el área total de la unidad, en kilómetros cuadrados o hectáreas.

Para la correcta interpretación de este indicador se tiene en cuenta la siguiente tabla de rangos con su respectiva calificación:

Tabla 5 Clasificación de la cobertura vegetal natural.

Categoría	Descripción	Rango
NT	No transformado o escasamente transformado. Sostenibilidad alta	IVR ≥ 70%
PT	Parcialmente transformado. Al menos el 70% de la vegetación primaria permanece sin alterar. Sostenibilidad media	IVR ≥ igual al 50% y < del 70%
MDT	Medianamente transformado. Sostenibilidad media baja	IVR ≥ a 30% y < del 50%
MT	Muy transformado. Sostenibilidad baja	IVR ≥ a 10% y < 30%
CT	Completamente transformado.	IVR < 10%

Fuente: CPA ingeniería, 2018.

Metodología Corine Land Cover

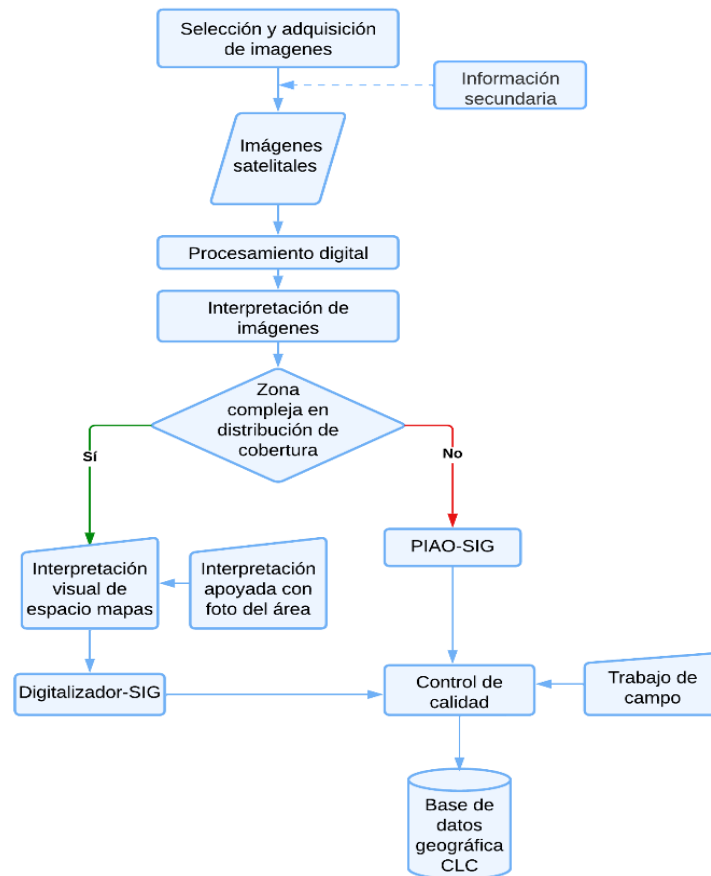
Esta metodología es de origen francés impulsada por la Comisión de la Comunidad Europea en 1990, por medio del proyecto de cobertura de la tierra,

dentro del plan CORINE (Coordination of information on the environment). Por medio de este se definió el método para hacer el registro específico de las coberturas de la tierra (IDEAM, 2007).

Fue acoplada en Colombia por el Instituto Geografico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en donde la base de esta permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las principales propiedades de las coberturas terrestres, utilizando imágenes satelitales de tipo Landsat para la elaboración de cartografía en una escala específica (Gutierrez, 2021). El esquema metodológico se define por las siguientes fases:

1. Obtención y organización de la información
2. Análisis e interpretación
3. Verificación de campo
4. Control de calidad
5. Generación de las capas de coberturas

Ilustración 1. Modelo de metodología Corine Land Cover (CLC)



Elaboración propia

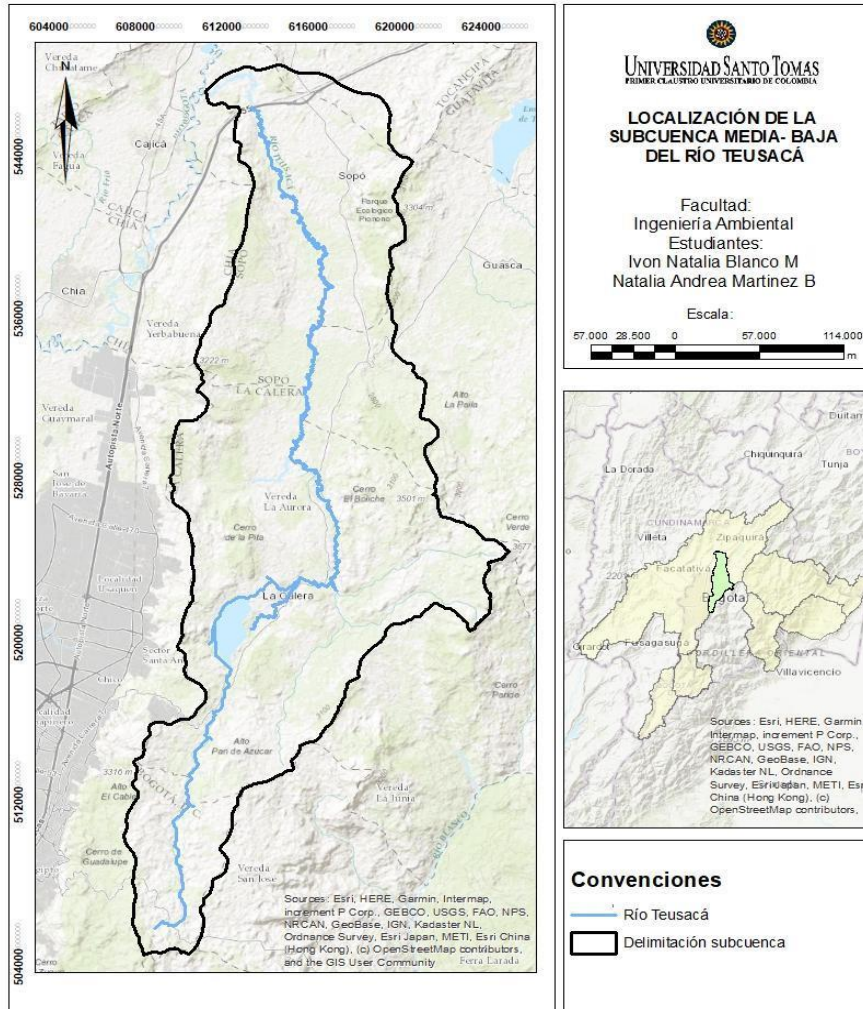
Fuente: IDEAM, IGAC (2007)

1. METODOLOGÍA

5.1 Localización y descripción de la zona de estudio

Para el desarrollo de este trabajo investigativo se inició con la recolección de la información necesaria, en donde se identificó la ubicación de la zona de estudio junto con sus características ambientales, sociales y económicas. También se consultaron las dinámicas de los usos del recurso hídrico y de los diferentes tipos de suelos que allí se encuentran, para de esta forma poder identificar la problemática a desarrollar en este documento

Ilustración 2. Localización de la Subcuenca del Río Teusacá



Fuente: Elaboración propia

5.2 Recolección de información

En primera instancia, se realizó una revisión bibliográfica acerca de la información general en el río Teusacá. Para obtener esta información se consultaron proyectos de investigación que suministraron los datos necesarios para el desarrollo de la investigación. Por otro lado, los datos multitemporales de los parámetros físico-químicos en la zona de la subcuenca media-baja del río fueron solicitados a la Corporación Autónoma Regional -CAR de Cundinamarca.

Las imágenes satelitales tipo Landsat de la subcuenca del río Teusacá en la parte media-baja, de los años 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020 se descargaron por medio de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Estas fueron utilizadas para estudiar las variaciones en la vegetación que se encuentran junto al río, ya sea por deforestación o cualquier otra actividad que cause alteraciones en estos terrenos.

Adicionalmente se hicieron tres visitas de campo en los municipios de Sopó y La Calera con el fin de corroborar la información proporcionada por las imágenes satelitales en cuanto a la cobertura vegetal presente en la subcuenca del río, dando un recorrido por los diferentes puntos de muestreo. Allí se hizo la verificación de los datos obtenidos mediante un registro fotográfico acompañado de las coordenadas de los lugares que presentan los diferentes tipos de cobertura.

Con ayuda de una encuesta formulada, se consultó a un total de 50 personas que residen y trabajan en estos sectores acerca de los cambios que habían evidenciado en la zona de estudio del río Teusacá.

5.3 Procesamiento de información

Se estructuró una base de datos temporal por medio de la herramienta Excel, allí se encuentra digitada la información recolectada durante el desarrollo del proyecto, se registraron los parámetros fisicoquímicos de la subcuenca media-baja del río Teusacá, al igual que las coordenadas de cada punto en donde se

realizó la toma de la muestra y la caracterización de la cobertura vegetal de la zona de estudio.

5.4 Procesamiento de Imágenes satelitales

Para realizar el análisis multitemporal de los cambios de la cobertura vegetal en el área se obtuvieron imágenes satelitales tipo Landsat de los años 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020 por medio de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Para cada año se escogieron las imágenes con un rango de nubosidad entre el 0% y 20%

Después de seleccionar las correspondientes imágenes, estas fueron sometidas a una corrección de bandeado, debido a que las imágenes obtenidas del satélite Landsat 7, presentan errores y vacío de datos por una falla en uno de los sensores del satélite presente desde el año 2002, así que, las imágenes generadas muestran huecos en forma de líneas diagonales paralelas en toda la imagen causando la pérdida de información de hasta un 22%, por esto son denominadas como Scan Line Corrector (SLC) (Gonzalez, 2018). Para la corrección del bandeo se usó el software QGIS en donde se realizó una interpolación para obtener datos en los píxeles vacíos por medio de la herramienta "Relleno sin datos", el objetivo es establecer los valores sin información en el ráster de origen a un valor específico, generando así un conjunto de datos ráster con píxeles vacíos. El algoritmo se asegura de mantener el tipo de datos del ráster de entrada. Por ejemplo, si se aplica un valor de relleno de punto flotante a un ráster entero, este valor será truncado adecuadamente. La confiabilidad de los resultados de la interpolación puede depender de la calidad de los datos de entrada, el método de interpolación y la distribución espacial entre los puntos de datos. (Herramientas de ráster-documentación de QGIS, 2023).

A partir de este momento se emplea el software ArcGis. Se realiza una corrección o eliminación de nubes en cada una de las imágenes a tratar, para

esto se tomaron imágenes del mismo año o un año cercano para eliminar las nubes y llenar los vacíos de información que estas dejaban, este procedimiento se realizó por medio de la herramienta “Análisis de imagen”, “Mosaico”.

Por otro lado, se realizó la corrección radiométrica para cada una de las imágenes, esta corrección se hace con el fin de considerar las variaciones en la intensidad del píxel (niveles digitales) causados por el objeto o la escena que se escaneó (mal funcionamiento del sensor, efectos atmosféricos o efectos topográficos) (IDEAM, 2023). Para esto se empleó la herramienta “Raster Calculator”, en donde, se agregaron cada una de las bandas que componen la imagen satelital a tratar y se insertó una ecuación de radiancia para Landsat. A continuación se presenta la ecuación a emplear, seguido de la tabla de valores específicos de L(máx y min) y DN (max y min) establecidos para este tipo de corrección en Landsat 7.

$$R\lambda = \frac{Lmax\lambda - Lmin\lambda}{DN\ max - DN\ min} * (DN - DNmin) + Lmin\lambda$$

Ecuación 4. Corrección radiométrica

Donde

Lminλ y Lmaxλ: Radiancia espectral escalada W/m2/sr/μm

DNmáx: Para cada banda máximo en W/m2/sr/μm

DNmín: Para cada banda máximo en W/m2/sr/μm

DN: Numero digital (0-255)

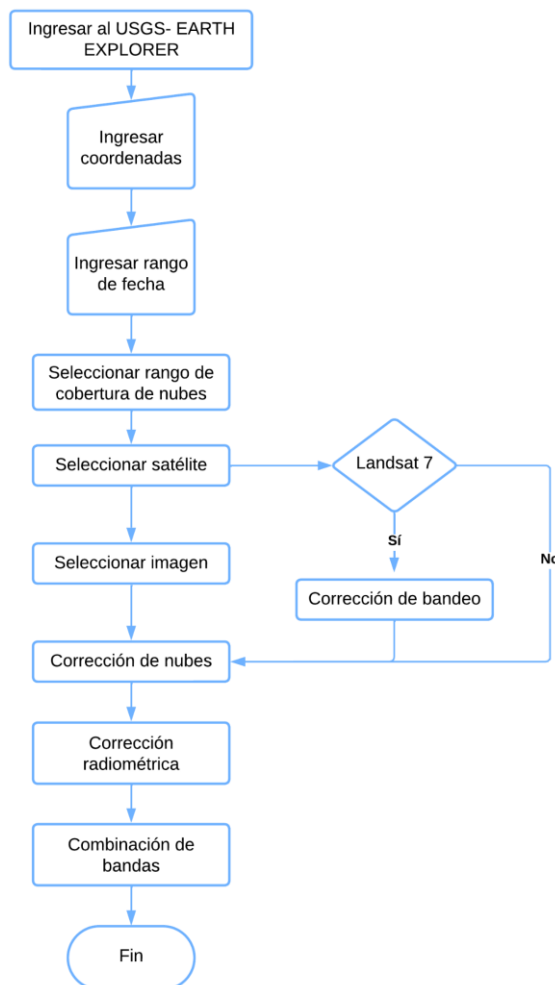
Tabla 6. Valores corrección radiométrica para Landsat 7

Band number	LMIN	LMAX
1	-1,765	178,941
2	-3,576	379,055
3	-1,502	255,695
4	-1,763	242,303
5	-0,411	30,178
6	1,238	15,600
7	-0,137	13,156

Fuente: Tasumi et al., 2003

Seguidamente se realizó el corte de la subcuenca con cada una de las bandas por medio de la herramienta “clip-raster” y se procede a realizar la combinación de bandas, en el menú ventanas se selecciona la herramienta “Análisis de imagen” y “Combinación de bandas”, esto con el fin de tener una mejor interpretación de los elementos presentes en las imágenes; para este caso se realizó la combinación de las bandas 3,2,1, obteniendo un color natural.

Ilustración 3. Metodología de obtención y procesamiento de imágenes satelitales.



Fuente: Elaboración propia

Con lo anterior se procedió a realizar los modelos cartográficos para reconstruir el pasado de la subcuenca en cuanto a la dinámica de la cobertura vegetal en el área establecida.

5.5 Clasificación de la cobertura del suelo

Para la elaboración de los mapas de clasificación de la cobertura del suelo por medio de la metodología Corine Land Cover se empleó el software ArcGIS. Primeramente, se realiza una clasificación no supervisada, por medio de la herramienta “Iso cluster unsupervised classification”, en donde, se introduce el raster obtenido de la combinación de bandas y se selecciona un rango de 12 clases; dando como resultado un raster con 12 clasificaciones, estas serán usadas para determinar los tipos de coberturas que se encuentran en la zona de estudio. Entre mayor sea el rango de clases mejores resultados se obtienen al momento de reclasificar.

Teniendo como guía la imagen satelital de color natural y las imágenes fotográficas obtenidas en campo, se realiza una reclasificación de las clases generadas en el procedimiento anterior por medio de la herramienta “Reclassify”, esto nos permite identificar y homogenizar los tipos de coberturas que se encuentran en el área de estudio. En este caso se obtuvieron 6 clasificaciones las cuales son: Tejido Urbano Continuo, Mosaico de pastos y cultivos, Pastos limpios, Cuerpos de agua artificiales, Herbazal y Arbustal.

Por último, se convierte el raster obtenido a polígono con la herramienta “Raster to Polygon” y se disminuye la cantidad de polígonos de acuerdo a los tipos de coberturas obtenidas, esto se realizó por medio del geoproceso “Dissolve”.

Con lo anterior, se tienen los mapas finales usados para describir los cambios multitemporales de manera general y así proceder a realizar un análisis conjunto de la información obtenida tanto en campo como de manera bibliográfica o teórica.

5.6 Estimación de indicadores

Inicialmente se calculó el índice de calidad del agua (ICA) para las estaciones de monitoreo Puente La Cabaña ubicado en La Calera y Río Teusacá después Humedal Aposentos ubicada en Sopo, con el fin de determinar el estado en el que se encuentra la cuenca. Cabe aclarar que los datos usados para el cálculo de este indicador fueron proporcionados por la CAR- Cundinamarca y estos solo tenían en cuenta un dato para cada parámetro, al igual que un solo día de muestra para cada una de las estaciones mencionadas anteriormente. Para realizar el cálculo de este indicador en corrientes superficiales, se realiza una expresión numérica basada en la sumatoria aritmética equiponderada de los que se obtienen al medir la concentración de cinco o seis variables fisicoquímicas básicas (IDEAM, 2021). En este caso se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: oxígeno disuelto, sólidos totales, DQO, conductividad eléctrica y pH. Cabe resaltar que estos se tomaron en base al IDEAM, en donde se especifican los parámetros a tener en cuenta al aplicar el ICA de 5 variables.

Seguido del procesamiento de las imágenes satelitales, la correcta clasificación de la cobertura vegetal presente en la zona de estudio referente a los años seleccionados, y junto con la base de datos, se relacionaron los resultados de las coberturas y el porcentaje del área total de la zona de estudio, para así lograr identificar las pérdidas y ganancias que se observan según la clasificación realizada.

Para tener constancia del cambio de la cobertura vegetal natural del suelo presente en el área de estudio, se realizó el cálculo del indicador Tasas de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN). Con ayuda de este indicador se determinó el grado de conservación de la cobertura, cantidad de hábitat natural intacta y los patrones de conversión.

Por último, se realizó el cálculo del Índice de vegetación remanente (IVR) con el fin de expresar el porcentaje transformado del total de la cobertura vegetal natural en el área de estudio.

5.7 Análisis de la información

Inicialmente, se realizó un estudio de estadística descriptiva por medio de diagramas de torta, diagramas de barras y diagramas de líneas, los cuales se emplearon para analizar el porcentaje de cobertura de la tierra por año, la comparación del área por coberturas entre los años 2001-2006, 2006-2011, 2011-2016 y 2016-2020, la variación de los Índices de calidad del agua de cada estación por año y por último la relación de los cambios de la cobertura de la tierra con el índice de calidad del agua por cada año; con el fin de representar la información obtenida de manera organizada y clara.

Para determinar los factores que inciden en la calidad del agua de la subcuenca del río Teusacá, se realizó un análisis de cada uno de los parámetros fisicoquímicos determinados para el cálculo del índice de calidad del agua (ICA) relacionados a las actividades que se desarrollaron en la zona en el periodo de tiempo estudiado.

Seguidamente se realizó el análisis multitemporal de la cobertura de la tierra, en donde, con ayuda de la cartografía realizada previamente e información bibliográfica se determinó el porqué de los cambios de cada una de las coberturas presentadas, esto para cada uno de los años estudiados en el proyecto. Con lo anterior y a partir del índice de calidad del agua, se analiza la relación presente entre los cambios de cobertura de la tierra y el cambio de la calidad del agua a través del tiempo. Teniendo en cuenta factores ambientales, económicos y sociales.

Por último, de acuerdo con los resultados de la encuesta estructurada realizada a los habitantes de los municipios de La Calera y Sopó, se realizó un plan de

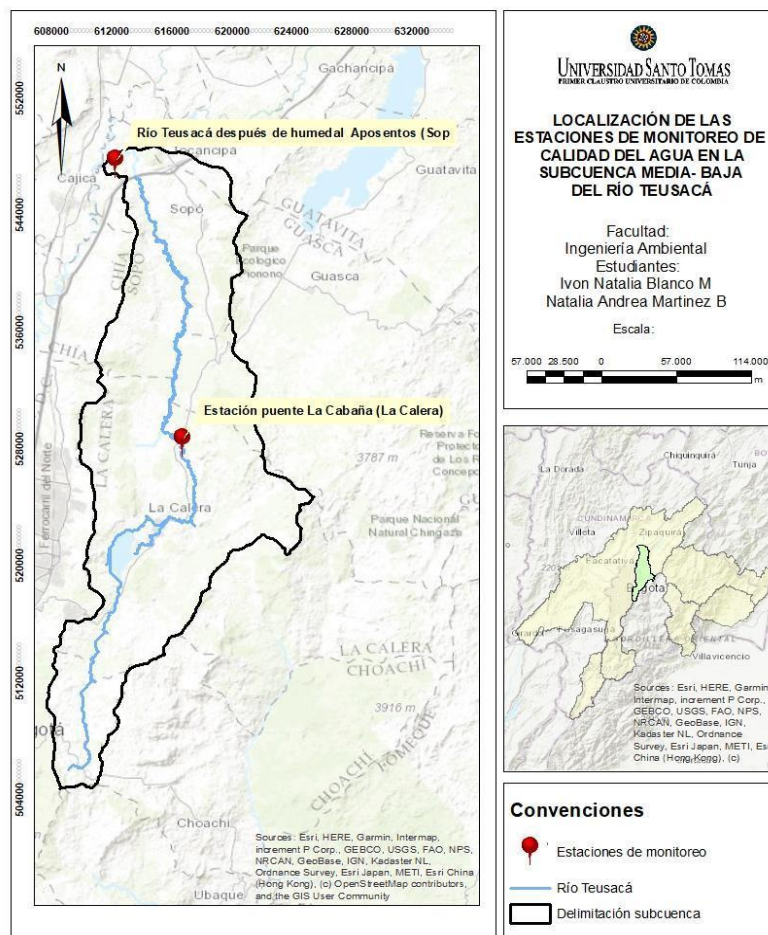
acción adecuado para la subcuenca media-baja del río Teusacá, con propuestas para su recuperación.

2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Análisis multitemporal del índice de calidad del agua (ICA)

Para el desarrollo de este proyecto se inició con la recolección de datos de calidad de agua del río Teusacá. Para esto se recurrió a la Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca, en donde se solicitaron los datos de la cuenca media baja del río de los años 2001, 2006, 2011, 2016, 2020, para así finalmente obtener los datos de dos estaciones de monitoreo; Puente La Cabaña, ubicado en el municipio de La Calera y la estación Río Teusacá después del Humedal Aposentos ubicado en Sopó.

Ilustración 3. Localización de las estaciones de monitoreo de calidad del agua en la Subcuenca del Río Teusacá



Fuente: Elaboración propia

Por cada estación se seleccionaron los parámetros de oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad eléctrica y pH, los cuales fueron organizados en la Tabla 7. Estos parámetros son determinados por el IDEAM al emplear 5 variables para el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA).

Tabla 7. Datos ordenados de parámetros de calidad de agua

AÑO	PARÁMETRO	ESTACIÓN			HORA DE MUESTREO	FECHA MUESTREO	UNIDADES
		PUENTE LA CABAÑA (LA CALERA)	HORA DE MUESTREO	RÍO TEUSACÁ DESPUÉS HUMEDAL APOSENTO (SOPO)			
2001	Oxígeno disuelto	3,5	11:20	5,1	14:40	26/06/2001	mg O ₂ /L
	Sólidos suspendidos totales	19		11			mg SST/L
	DQO	23,9		12,3			mg O ₂ /L
	Conductividad	49,2		65,6			mS/cm
	pH	6,9		7			-
2006	Oxígeno disuelto	4,7	11:40	6,3	10:45	16/03/2006	mg O ₂ /L
	Sólidos suspendidos totales	37		80			mg SST/L
	DQO	18,6		83,3			mg O ₂ /L
	Conductividad eléctrica	105		184			mS/cm
	pH	7,4		7,4			-
2011	Oxígeno disuelto	7,8	11:00	7,8	12:35	18/01/2011	mg O ₂ /L
	Sólidos suspendidos totales	5,7		12,2			mg SST/L
	DQO	18,6		38			mg O ₂ /L
	Conductividad	258		238			mS/cm
	pH	6,9		7,8			-
2016	Oxígeno disuelto	5,5	12:00	5,9	12:40	28/09/2016	mg O ₂ /L
	Sólidos suspendidos totales	24,4		27			mg SST/L
	DQO	16,1		<LCM			mg O ₂ /L
	Conductividad	42,3		42,4			mS/cm
	pH	7,1		6,9			-
2020	Oxígeno disuelto	4,91	7:03	0,8	7:03	06/10/2020	mg O ₂ /L
	Sólidos suspendidos totales	119		16			mg SST/L
	DQO	14,1		41,23			mg O ₂ /L
	Conductividad eléctrica	140		356			mS/cm
	pH	7,47		7,15			-

Fuente: Elaboración propia

La información de la Tabla 7. Se obtuvo de los informes disponibles suministrados por la CAR de Cundinamarca. La mayoría de estos datos fueron tomados en horas de la mañana, debido a la poca actividad biológica y química en el agua en estas horas del día lo que puede reducir la concentración de algunos contaminantes. Mientras que los muestreos hechos en horas de la tarde pueden afectar estos resultados, debido a factores como la luz solar y el aumento de las actividades antrópicas (Guía para la medición en campo de calidad del agua | HANNA Instruments Colombia, 2023).

Ahora bien, el análisis de estos parámetros es una gran herramienta ya que estos funcionan como indicativos de la composición y el comportamiento de los contaminantes, aportando más información para la evaluación de la calidad del agua en el río. A continuación, se explica cada uno de los parámetros

6.1.1 Oxígeno disuelto

Con respecto al primer parámetro de oxígeno disuelto, este señala la cantidad de oxígeno (O₂) disponible en el agua que favorece al desarrollo de la biodiversidad dentro del cuerpo lóxico. Así mismo, se usa como indicador del grado de contaminantes orgánicos, el índice de descomposición de sustancias de fácil oxidación y la capacidad de autodepuración de la corriente superficial (DANE, 2007).

Teniendo en cuenta que en Colombia según el Decreto 1076 de 2015 se establece que el valor límite permisible de este parámetro debe ser mayor o igual a 5.0 mg/L para aguas dulces frías (IDEAM, 2013), con esto se puede observar que para la estación Puente La Cabaña (La Calera) los datos que allí se proporcionan en general se mantienen en niveles adecuados a través de los años, pero en el 2001 se ve por debajo del límite con un valor de 3.5 mg/L. Por otro lado, la estación Río Teusacá después del Humedal Aposentos (Sopó) parece mostrar el mismo comportamiento de mantenerse en un nivel aceptable por encima del límite, exceptuando el año 2020 en donde se presenta un descenso considerable de este parámetro con un valor de 0,8 mg/L.

Este parámetro puede verse afectado por los vertimientos de aguas residuales que allí se presentan, ya que los contaminantes y la materia orgánica presentes forman una película delgada sobre la superficie del agua, lo que afecta la transferencia de oxígeno y la reoxigenación de la corriente de agua (Moyano et al., 2021).

Teniendo en cuenta que tanto en el municipio de Sopó como en el de La Calera se realizan vertimientos por parte de sus plantas de tratamiento de aguas residuales y por los distintos sectores industriales allí ubicados (Corporación Autónoma Regional, 2021), es viable asumir que el descenso del oxígeno disuelto puede verse afectado por este factor.

6.1.2 Sólidos suspendidos totales (SST)

Este parámetro hace referencia al material particulado que se encuentra suspendido en una corriente superficial. También se considera como el total de residuos retenidos en un filtro de 0,45 μm y corresponden aproximadamente a los sólidos insolubles de la muestra. Estos pueden ser materiales como arcillas, gravas y arenas, al igual que puede ser material orgánico como bacterias y algas. En Colombia este indicador no se ha regulado para la evaluación de la calidad del agua, sin embargo, el IDEAM propone utilizar 150 mg/L como valor límite que muestre contaminantes en el agua (Orjuela, 2013).

Se puede observar en la tabla 6. que para ambas estaciones los valores siempre se encuentran muy por debajo del valor límite propuesto, pero para el año 2020 la estación ubicada en La Calera muestra un valor más elevado de 119 mg/L.

En este caso, una de las razones para que la cantidad de sólidos suspendidos aumente en un cuerpo lóxico es la erosión hídrica, en este caso de tipo fluvial, la cual representa el desgaste de la superficie del suelo provocada por el agua canalizada en cuerpos de agua como ríos, arroyos o torrentes. Teniendo en cuenta la velocidad y el constante paso de agua, esto puede generar un agente activo con la capacidad de alterar el relieve que conforma al cuerpo en cuestión (Bordino, 2021).

Teniendo en cuenta esto y que en el año 2020 en el país se presentó una fuerte temporada de lluvias finalizando el año, lo cual provocó inundaciones en 18 municipios de Cundinamarca y deslizamientos de tierra en 7 de ellos, entre estos La Calera (OCHA, 2020), se puede inferir que debido al aumento de las precipitaciones, la erosión hídrica en el río también se incrementó y junto con los deslizamientos de tierra, se obtuvo como resultado más arrastre de sedimentos en esta parte del río Teusacá.

6.1.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Este parámetro señala la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la carga orgánica en la muestra de agua, teniendo en cuenta el agente oxidante, la temperatura y el tiempo. Este método está destinado principalmente a medir la concentración de sustancias orgánicas, pero puede presentar perturbaciones provocadas por sustancias inorgánicas fácilmente oxidables como sulfuros, sulfitos, yoduros, etc (Rodríguez, 2007).

Para este parámetro las concentraciones aceptables son de 50 mg/L (DIGESA, 2023), para lo cual se puede observar que los valores de la estación Puente La Cabaña se mantienen por debajo del límite establecido, mostrando bajas concentraciones de materia orgánica en el agua.

Por otro lado, en la estación Río Teusacá después del Humedal Aposentos se observa que para el año 2006 se registró un valor de 83,3 mg/L, lo cual puede deberse a escurrimientos de material orgánico originario de las actividades ganaderas y agrícolas que se llevan allí a cabo. Además de esto se puede observar que en ese mismo año se obtuvo un valor de 80 mg/L de sólidos suspendidos totales, lo que muestra que en ese año hubo una mayor descarga de material orgánico en el río, afectando así la calidad del agua de este.

6.1.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en el agua se define como la capacidad del líquido para conducir una corriente eléctrica y esta se muestra en una expresión numérica. Tal capacidad depende de las sales ionizadas presentes y su grado de concentración, movilidad, valencia, concentración relativa y la temperatura al momento de ser medida (DIGESA, 2023).

Para este caso, el valor límite permisible para Colombia es de 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, 2007), y como se puede observar en la tabla 7. los datos de ambas estaciones se mantienen por debajo de este límite a través de los años, lo cual representa que hay un bajo contenido de compuestos ionizados en el río, lo que al mismo tiempo permite deducir que la escorrentía agrícola y ganadera no es muy significativa, al igual que la lixiviación de contaminantes del suelo u otras fuentes puntuales.

Aunque en el año 2020 en la estación Río Teusacá después del Humedal Aposentos se registra el valor más elevado de 356 $\mu\text{s}/\text{cm}$, pero según Rodríguez et al. (2010), las conductividades por debajo de 500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ no representan un riesgo y el agua de la muestra puede ser utilizada para fines domésticos.

6.1.5 pH

El pH (potencial de hidrógeno) es una medida del nivel de acidez, basicidad y alcalinidad en el agua. Este parámetro también puede provocar cambios en la estructura de la flora y fauna del cuerpo de agua y afecta a su vez el nivel de toxicidad de ciertos compuestos, como el amoníaco, los metales pesados, el ácido sulfhídrico, etc (Gualdrón, 2016).

La resolución 1096 de 2000 en Colombia establece que, para cuerpos de agua superficiales, el valor de pH es aceptable cuando se encuentra entre 6 y 8.5 unidades de pH (IDEAM, 2020). Con esto se puede observar que en general el pH del río Teusacá se encuentra dentro del rango establecido y la variabilidad de este no se muestra de manera significativa, dando a entender que en el río se desarrolla una buena interacción entre los ecosistemas y los organismos que allí se encuentran. Esto al mismo tiempo muestra que los procesos naturales como la fotosíntesis y la respiración no están siendo alterados de manera negativa.

Con los parámetros anteriores se realizan los cálculos correspondientes y se obtienen los resultados del indicador. Seguidamente se consultó la tabla de calificación del ICA en donde a cada resultado se le asignó una clasificación y un color, lo cual se puede observar en la siguiente tabla:

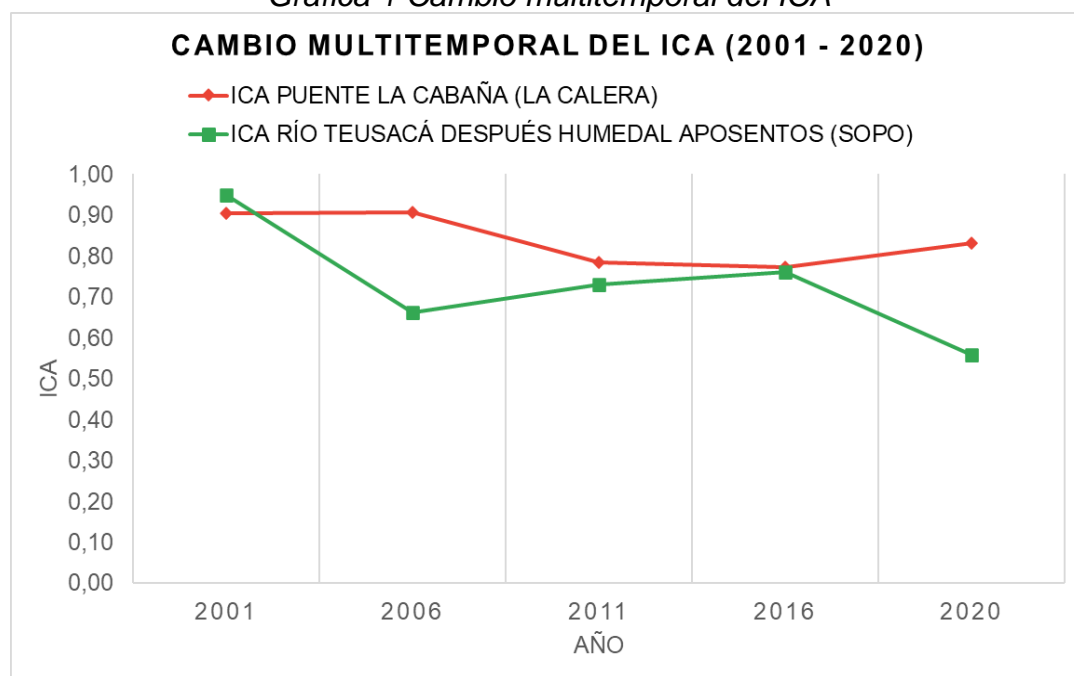
Tabla 8. Resultados del ICA para todos los años

AÑO	ICA PUENTE LA CABAÑA (LA CALERA)	CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	ICA RÍO TEUSACÁ DESPUÉS HUMEDAL APOSENTO (SOPO)	CALIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
2001	0,90	Aceptable	0,95	Buena
2006	0,91	Buena	0,66	Regular
2011	0,79	Aceptable	0,73	Aceptable
2016	0,77	Aceptable	0,76	Aceptable
2020	0,83	Aceptable	0,56	Regular

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, en general se presentan cambios apreciables, sin embargo estos se mantienen en un rango limitado, además se observa que durante este periodo de tiempo el río se mantuvo en un estado de calidad aceptable. El comportamiento de este indicador se puede observar en la Gráfica 1.

Gráfica 1 Cambio multitemporal del ICA



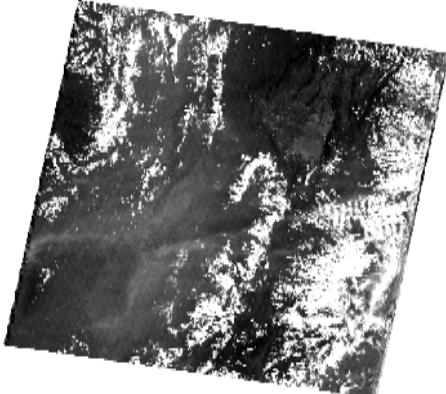
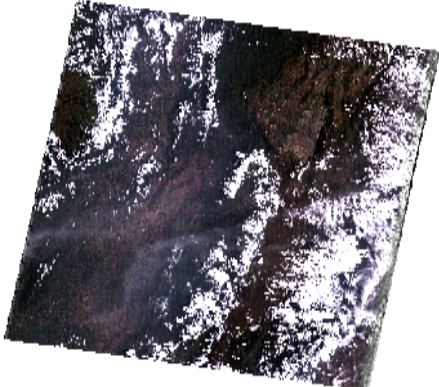
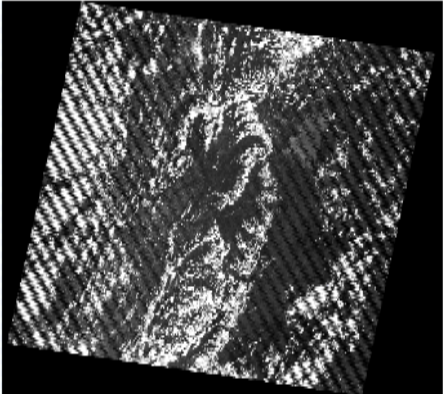
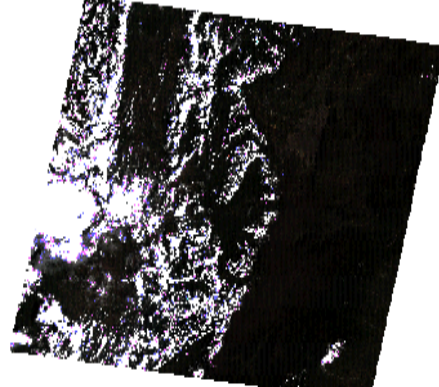
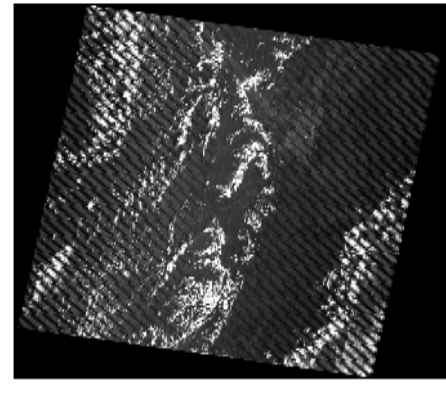
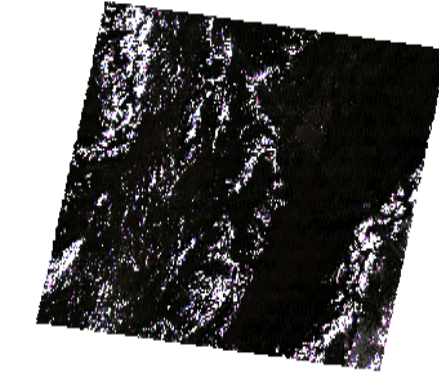
Fuente: Elaboración propia

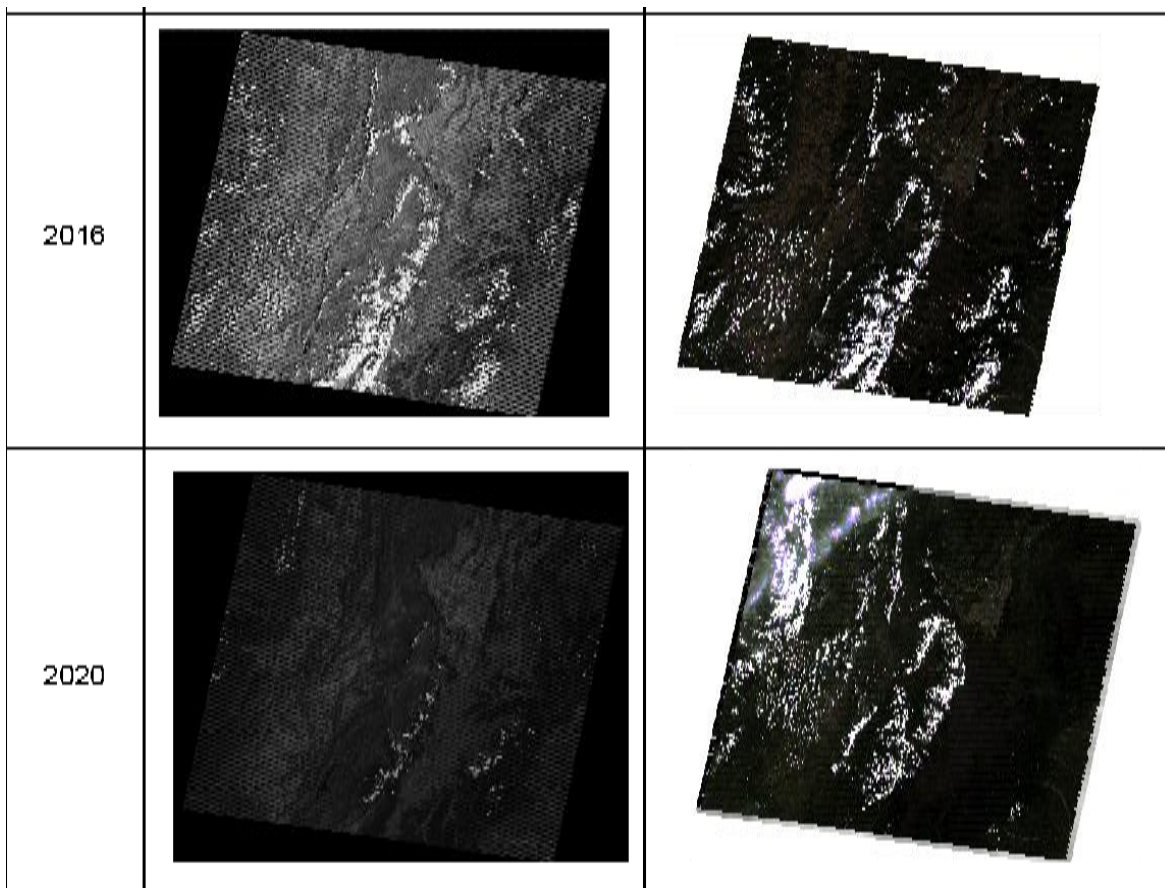
6.2 Análisis multitemporal de la cobertura de la tierra

Para realizar este análisis se obtuvieron las imágenes satelitales de Landsat 7 correspondientes a los años 2001, 2006, 2011, 2016 y 2020, por medio de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Después estas fueron sometidas a un proceso de interpolación de datos y de corrección radiométrica, para finalmente obtener como resultado imágenes sin bandas y con mayor claridad, facilitando así el proceso de clasificación de las coberturas.

En la Tabla 9. se puede apreciar el comparativo de las imágenes al ser inicialmente descargadas y el después de ser corregidas:

Tabla 9. Corrección de imágenes satelitales.

AÑO	IMÁGENES SIN CORREGIR	IMÁGENES CORREGIDAS
2001		
2006		
2011		



Fuente: Elaboración propia

Con las imágenes ya corregidas se realizaron los modelos cartográficos utilizando el software ArcGIS, en donde con la metodología Corine Land Cover se logró hacer la siguiente clasificación de las coberturas presentes en la cuenca por cada año.

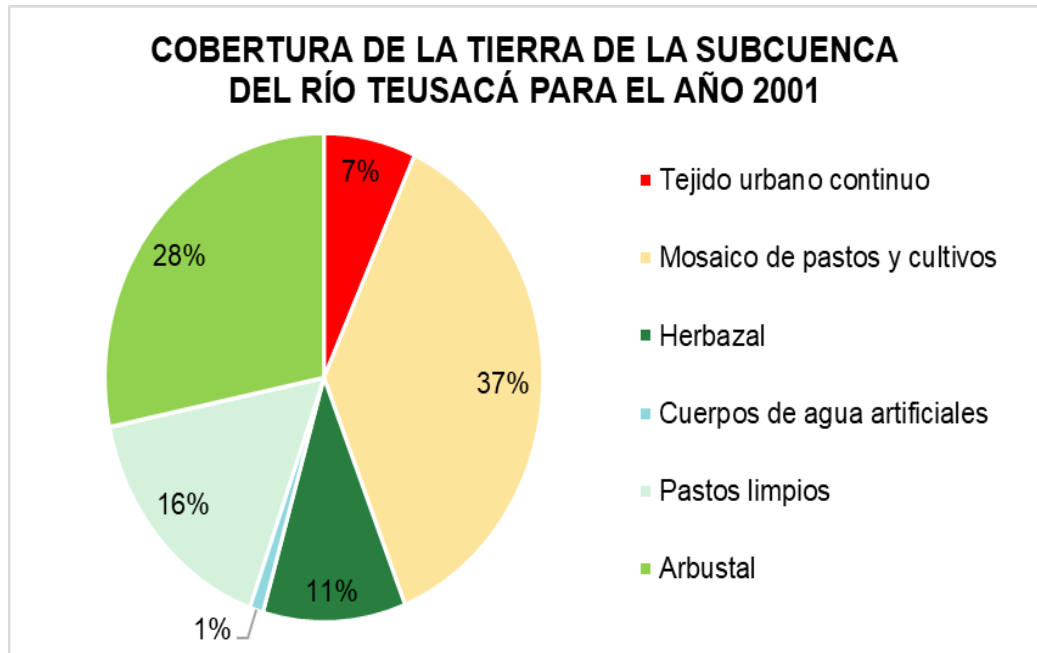
Clasificación de las coberturas del suelo

Para determinar el tipo de coberturas presentes en cada uno de los años de estudio se realizó una clasificación no supervisada por medio del Software ArcGis sobre las imágenes satelitales obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Esta clasificación arroja 12 clases de coberturas, que luego se homogenizan relacionando de forma manual la información de las imágenes satelitales, esto permite realizar una identificación y clasificación más asertiva sobre los tipos de coberturas de la zona por año con la metodología Corine Land Cover. Como resultado se obtuvieron 6 tipos de coberturas, Herbazal, Arbustal, Mosaico de pastos y cultivos, Tejido urbano continuo, Pastos limpios y Cuerpos de agua superficiales.

Clasificación de las coberturas del suelo para el año 2001

En el año 2001, la cobertura del suelo dominante de mosaico de pastos y cultivos contenía un área aproximada de 12854 hectáreas que representaba un 36% del territorio; en segundo lugar se encuentra la cobertura arbustal con un área aproximada de 9768 hectáreas que ocupaban un 27,4 % del territorio, en tercer lugar se tiene pastos limpios con un área de 5621 hectáreas representando un 15,8 % de la superficie de la cuenca, la cobertura herbazal ocupaba un área de 3644 hectáreas lo que significa un 10,2% de la cobertura total, por otro lado, el tejido urbano continuo abarca un área de 2352 hectáreas representando un 6,6 % de la superficie, por último se encuentra cuerpos de agua artificiales con un área de 350 hectáreas ocupando así apenas un 0,98 % de la cobertura de la subcuenca.

Gráfica 2. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2001



Fuente: Elaboración propia

Para el año 2001, en la parte externa de la subcuenca del Río Teusacá se presentan coberturas denominadas Arbustal y Herbazal con mayor densidad en la parte oriental de la cuenca ya que tiene cercanía a las reservas forestales de los cerros orientales de Bogotá, debido a que en esta zona se encuentra el nacimiento del Río Teusacá, el Parque Nacional Natural Chingaza, la Reserva Forestal Protectora de Bosques de la Marcada, el Parque Ecológico La Montaña y la Reserva Natural La Palma, entre otros. Por otro lado, en la parte sur de la cuenca se encuentra El Parque Natural Sumapaz en la región andina y el Parque Natural Regional Chicaque. Este tipo de cobertura se encuentra en este sector debido a que se refieren a áreas cubiertas principalmente por arbustos, matorrales, hierbas y plantas de pequeño tamaño.

En la parte media de la cuenca se pueden observar cuerpos de agua artificiales, debido a la presencia del embalse artificial San Rafael, que cumple con el propósito de regular el caudal del río Bogotá y suministrar agua para la ciudad de Bogotá y su área metropolitana, y en su parte alta se encuentra la laguna Teusacá/el Verjón.

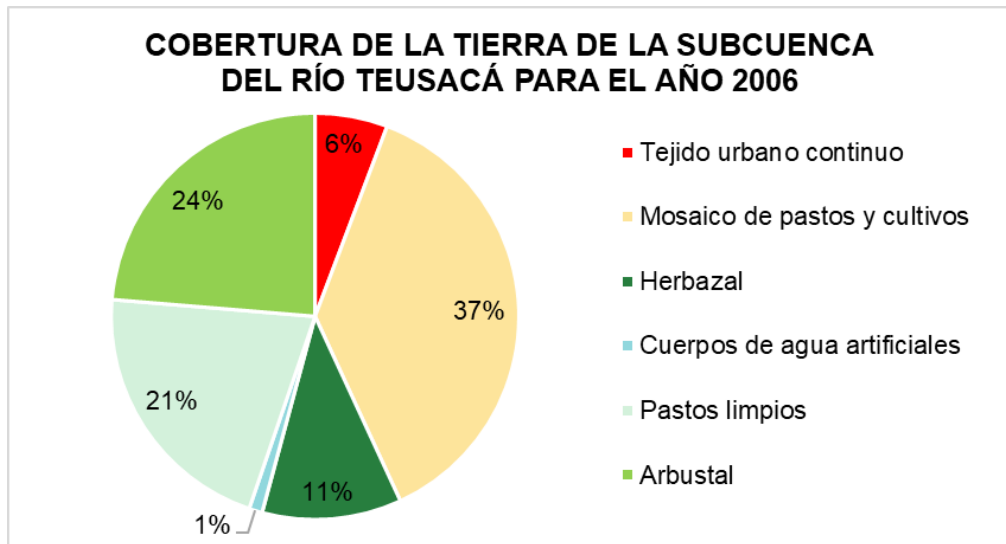
En el centro de la subcuenca en su parte media, cercana al cauce del Río Teusacá se presentan los pastos limpios, que se dan principalmente en zonas de actividad ganadera. Adicionalmente, la cobertura predominante de mosaico de pastos y cultivos se distribuye en la parte central de la subcuenca, cerca al río Teusacá. Este tipo de coberturas representan para este año un 53% de la cobertura total de la subcuenca, esto se debe a que las principales actividades económicas son la agrícola y pecuaria, en donde, predominan los monocultivos de papa y el ganado bovino de forma extensiva, adicionalmente, en algunos sectores como el Verjón bajo presentaban en menor medida actividades pecuarias de baja producción, para la venta de leche y sus derivados (Carrero Niño, 2012).

Por último, el tejido urbano continuo se encuentra en zonas urbanizadas de la subcuenca, como en las cabeceras municipales de La Calera, Sopó y Briceño o en áreas cercanas al cauce del río, como viviendas suburbanas, fincas o viviendas campesinas dedicadas a actividad caballista, engorde y producción bovina (Carrero Niño, 2012).

Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2006

En el año 2006, la cobertura del suelo dominante de mosaico de pastos y cultivos contenía un área aproximada de 13324 hectáreas que representaba un 37% del territorio; en segundo lugar se encuentra la cobertura arbustal con un área aproximada de 8443 hectáreas que ocupaban un 23,67 % del territorio, en tercer lugar se tiene pastos limpios con un área de 7516 hectáreas representando un 21,07 % de la superficie de la cuenca, la cobertura herbazal ocupaba un área de 3948 hectáreas lo que significa un 11,07 % de la cobertura total, por otro lado, el tejido urbano continuo abarca un área de 2052 hectáreas representando un 5,75 % de la superficie, por último se encuentra cuerpos de agua artificiales con un área de 376 hectáreas ocupando así apenas un 1,05 % de la cobertura de la subcuenca.

Gráfica 3. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2006



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la clasificación de cobertura de la tierra para el año 2006 se puede observar que la cuenca mantiene un comportamiento similar al año 2001, en cuanto a la distribución de las coberturas. Sin embargo, se presentan algunos cambios significativos en las diferentes categorías.

En primer lugar, se presenta el mayor aumento de 5,31% en la cobertura de pastos limpios y seguidamente se observa un incremento de 1,32% de mosaico de pastos y cultivos, lo que sugiere una mayor actividad agrícola y ganadera en la zona, esto, debido a un gran interés en la producción de alimentos y cultivos de flores por la dinámica económica que se presenta, aumentando constantemente el uso del suelo para estas actividades.

Seguidamente, la cobertura herbazal aumentó 0,85%, esto puede darse debido a que durante ese año se desarrollaron diversas actividades para la restauración ecológica, como la siembra de especies nativas y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, lo que podría haber contribuido al aumento de la cobertura herbácea. Estas prácticas podrían haber mejorado la calidad del suelo y proporcionado las condiciones adecuadas para el crecimiento de plantas

herbáceas, mientras que, la cobertura arbustal presentó una disminución de 3,71% alrededor de la subcuenca, esto puede estar relacionado con actividades como el sobrepastoreo, la expansión de la agricultura y la urbanización, que pueden llevar a la transformación de la vegetación natural en pastos y cultivos, y por ende, a la disminución de la cobertura arbustiva. Además, las especies arbustivas presentes en la zona son usadas como forraje por el ganado, lo que también puede afectar su crecimiento y regeneración natural. De manera que, la eliminación de la cobertura arbustiva permite una mayor penetración de luz solar y nutrientes en el suelo, lo que podría favorecer el crecimiento de plantas herbáceas (Corporación Autónoma Regional, 2023).

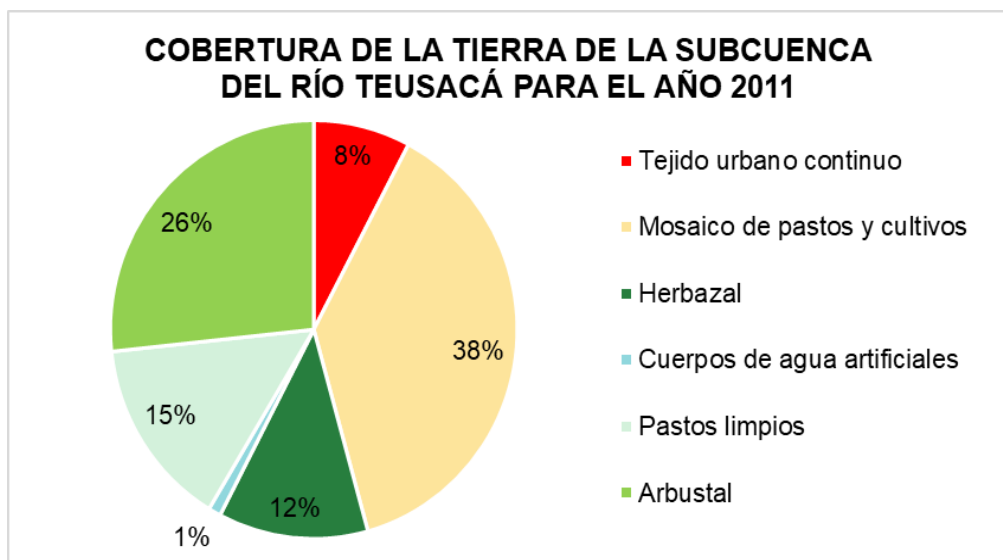
Por otro lado, el tejido urbano presentó una disminución del 0,84% con respecto al año 2001. En el año 2006 se publicó el Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora de los Cerros Orientales bajo la Resolución 1141, el cual da prioridad al uso forestal e implementa medidas penales para la realización de urbanización ilegal en estas zonas, lo que pudo impedir la expansión urbana en la cuenca del río Teusacá, también se relaciona con la expansión de las coberturas de pastos limpios y mosaico de pastos y cultivos, debido a que se compran predios principalmente para el desarrollo de estas actividades.

Por último, la cobertura de cuerpos de agua artificiales presentó un pequeño aumento de 0,07%, debido a un incremento en la construcción de embalses, lagos artificiales u otras estructuras similares debido a la demanda de agua para riego, actividades pecuarias o recreativas.

Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2011

En el año 2011, la cobertura dominante continúa siendo mosaico de pastos y cultivos con un área de 13547 hectáreas lo que representa un 38% de la superficie de la subcuenca, seguidamente la cobertura denominada arbustal posee 9514 hectáreas con un 26,68 % de las coberturas presentes en la zona, luego se encuentran los pastos limpios con un área de 5242 hectáreas, ocupando un 14,7 % del área total de la subcuenca. Por último, se encuentran las coberturas herbazal, tejido urbano continuo y cuerpos de agua artificiales con un área en hectáreas de 4252 , 2753 y 353 ocupando un 11,92%, 7,72 % y 0,99% de la cobertura de la subcuenca respectivamente.

Gráfica 4. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2011



Fuente: Elaboración propia

En el año 2011 se presenta un aumento de 0,62% en la cobertura predominante de mosaico de pastos y cultivos, sin embargo, aunque es la cobertura predominante, este aumento no fue el más significativo. En el municipio de La Calera en el sector agrícola, se destacan varios cultivos transitorios, como la cebolla de bulbo, la papa, la papa criolla, el fríjol, los gladiolos, la zanahoria, la

arveja y las hortalizas. También se destacan algunos cultivos permanentes, como las flores y follajes, la manzana, la mora y la uchuva. Además, hay algunos cultivos anuales, como el maíz y el frijol, y algunos cultivos forestales, como la acacia y el pino.

En el municipio de Sopó se presentan cultivos transitorios como la arveja, la papa, el ajo, el maíz y la cebolla de bulbo. Mientras que los cultivos permanentes son el durazno y la fresa. Además, también tienen una gran presencia de pastos cultivados, que no son propiamente cultivos agrícolas, pero son importantes para la actividad ganadera. Este tipo de actividades son de gran importancia para el departamento de Cundinamarca, por el desarrollo económico del sector, debido a que presentan gran potencial agrícola de acuerdo al tipo de suelo presente en la zona. Desde el año 2010 el sector agrícola en el municipio de Sopó registró tasas positivas de crecimiento, debido a productos como las hortalizas (57,7%), el maíz (46,6%) y frutos (41%), los cuales han crecido significativamente durante los años anteriores (Montenegro Valle, 2017).

Por otro lado, la cobertura herbazal y arbustal aumentaron un 0,85% y 3% respectivamente, este aumento en la zona de estudio se debe principalmente a un proceso de regeneración natural de la vegetación, tras la disminución de la actividad pecuaria y la reducción de la presión antrópica en la zona. La regeneración natural de la vegetación, particularmente de la cobertura arbustiva, se ve favorecida por una serie de factores, tales como la presencia de árboles maduros, la presencia de semillas en el suelo y la capacidad de algunas especies arbustivas para regenerarse a partir de fragmentos de raíces (Caleño Ortiz & Toro Figueredo, 2018).

Además, el aumento en la cobertura arbustiva también puede estar relacionado con un cambio en las condiciones climáticas, específicamente con el aumento de la precipitación en la zona de estudio, lo que podría haber favorecido el crecimiento de la vegetación arbustiva.

El tejido urbano continuo presentó un aumento de 1,69% debido al crecimiento significativo que ha experimentado el sector de la construcción hasta el año 2011

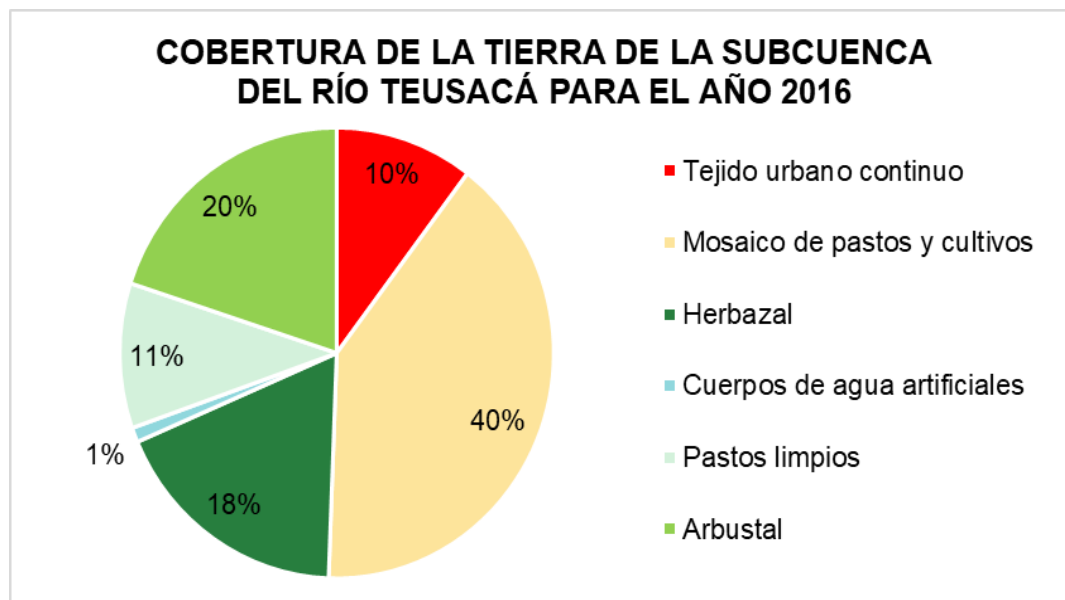
en Sopó, se menciona que la tasa de crecimiento fue del 79,1%, en este año, lo que permitió duplicar la cantidad de edificaciones construidas en comparación con los años anteriores (Montenegro Valle, 2017).

Este crecimiento se ha visto reflejado en el aumento entre 2011 y 2012, lo que indica que la construcción se ha convertido en una actividad cada vez más importante para la economía de la región. Como se mencionó anteriormente, el sector agropecuario no es muy significativo para Sopó, lo que sugiere que la construcción se ha convertido en una alternativa rentable para los propietarios de tierras en la zona. Además, debido a la proximidad a Bogotá y los menores costos de vida en la Provincia de la Sabana centro han convertido a Sopó en un lugar muy demandado para vivir.

Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2016

En el año 2016, la cobertura de mosaico de pastos y cultivos es quien cubre la mayor área de la subcuenca, con 14366,4 hectáreas, lo que representa el 40,29% del área total, manteniendo un comportamiento de constante crecimiento con respecto a los años anteriores. La siguiente categoría más grande es el arbustal, que cubre 7128,4 hectáreas, representando un 20 % del área total, seguidamente, la cobertura herbazal cubre 6403,4 hectáreas, lo que representa el 17,96% de la superficie de la subcuenca. Por otro lado, el tejido urbano continuo posee 3675,4 hectáreas, representando el 10,31% de la cobertura en la subcuenca y por último se encuentran los pastos limpios y la categoría de cuerpos de agua artificiales, con un área de 3711,4 y 376 hectáreas, lo que representa el 10,41% y 1,05% del área total respectivamente.

Gráfica 5. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2016



Fuente: Elaboración propia

En el año 2016, se puede observar la expansión que presentó la frontera agrícola mayormente en la parte baja de la subcuenca, ya que la cobertura de mosaico de pastos y cultivos tuvo un aumento de 2,3%. Para ese año, el municipio de La Calera dedicaba hasta el 60% de su área total en la actividad agrícola y ganadera, lo que equivale a 20492 hectáreas. De este total, 14000 hectáreas se destinaban a la ganadería, lo que indica que es una actividad importante y relevante en la zona. Además, la orientación de explotación predominante en la ganadería es el doble propósito en el 60% de las granjas productoras, lo que significa que se enfocan tanto en la producción de carne como en la de leche, lo que podría generar mayores ingresos (Andrade Florez, 2020).

En cuanto a la agricultura, los cultivos permanentes más representativos son el tomate de árbol, uchuva, mora, manzana y flores, aunque los cultivos de producción anual como el maíz tradicional y el frijol también son importantes. El área sembrada con cultivos permanentes ha disminuido en algunos casos, pero se ha mantenido en otros, lo que puede indicar que los cultivos más rentables y sostenibles se han mantenido en el tiempo. Además, los cultivos transitorios presentes en el Municipio son variados, lo que indica que hay diversificación en la producción agrícola (Andrade Florez, 2020).

Al mismo tiempo, el municipio de Sopó implementó un Plan de Desarrollo con el fin aumentar y fortalecer la actividad agropecuaria en el sector, en donde se incluyen programas para incentivar al trabajo agrícola y pecuario. (Alcaldía Municipal de Sopó, 2023).

La cobertura de pastos limpios presentó una disminución de 4,29%, debido a que la mayor actividad pecuaria se realizaba en el municipio de Sopó y este ha tenido un gran cambio de actividad productiva, ya que muchos de los predios que antes se dedicaban a la ganadería han sido reemplazados por la urbanización campestre de estratos socioeconómicos altos hasta llegar a la Cuenca del río Teusacá (Andrade Florez, 2020).

Así mismo, el tejido urbano continuo presentó un aumento de 2,59%, el más alto hasta el momento. Esto va ligado a lo dicho anteriormente, debido a la cercanía de los municipios de La Calera y Sopó con Bogotá, en donde habitan una gran cantidad de personas, que se enfrentan a problemas de espacios reducidos para vivir, congestión de vías, contaminación ambiental y altos costos de vida, muchas personas optan por buscar lugares que ofrezcan no solo comodidades de vivienda, sino también opciones de entretenimiento y proximidad a la capital. En este sentido, Sopó y La Calera se han convertido en una opción atractiva para vivir (Montenegro Valle, 2017).

Por otro lado, se presenta una disminución significativa y preocupante en cuanto a la cobertura arbustal, ya que disminuyó un 6,7%, debido a actividades de expansión agrícola y urbanización en la subcuenca como se puede observar en la Gráfica 5.

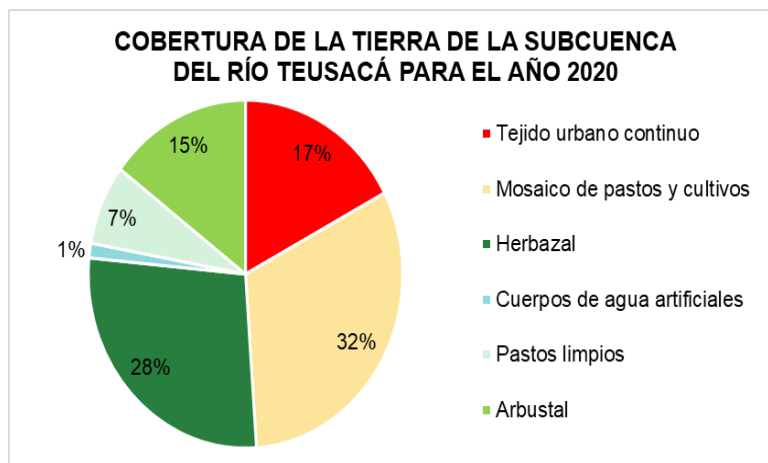
Finalmente, se presenta un aumento de 6,03 % en la cobertura herbazal, una de las razones de este cambio se da por la presencia de suelos degradados y perturbados por actividades antropogénicas, como la agricultura y la ganadería. Estos suelos suelen tener una menor capacidad de retención de agua y nutrientes, lo que favorece el establecimiento de especies herbáceas que son más resistentes a estas condiciones.

Además, el cambio en los usos del suelo también ha contribuido al aumento de la cobertura herbácea en los municipios de la subcuenca. En las últimas décadas, se ha registrado un aumento en la superficie de terrenos dedicados a actividades recreativas y deportivas, como campos de golf y parques públicos. Estas áreas suelen tener una menor densidad de árboles y arbustos, lo que permite el crecimiento de especies herbáceas (Montenegro Valle, 2017).

Clasificación de la cobertura del suelo para el año 2020

En el año 2020, en la subcuenca del Río Teusacá, se registraron las siguientes coberturas de tierra, mostrando un comportamiento similar al año anterior, en primer lugar se tiene la cobertura de mosaico de pastos y cultivos con 11270 hectáreas y un 31,6% de la cobertura total de la subcuenca, seguidamente se encuentra la cobertura herbazal con 9845 hectáreas, lo que representa el 27,61% del área total, el tejido urbano continuo, aumenta cada vez más con una ocupación de 6164 hectáreas, representando el 17,28%, la cobertura arbustal con 5241 hectáreas, siendo el 14,70% del área total, por último se presentan las coberturas de pastos limpios y cuerpos de agua artificiales ocupando un área de 2656 y 486 hectáreas con un porcentaje de 7,45% y 1,36% de las coberturas totales en la subcuenca.

Gráfica 6. Distribución en porcentaje de la cobertura vegetal en la Subcuenca del Río Teusacá en el año 2020



Fuente: Elaboración propia

Para el año 2020, la cobertura dominante mosaico de pastos y cultivos presentó una disminución de 8,68 %, en primer lugar, debido a que las actividades de agricultura y ganadería calificadas como actividades económicas primarias aportan solamente el 1,33% de la economía total del municipio de Sopó, debido a que se ha realizado un cambio en las principales actividades económicas donde el turismo, la industria, comercio y construcción abarcan el 72% de la economía del municipio (Alcaldía Municipal de Sopó, 2020). En el municipio de La Calera sucede algo similar, durante la elaboración del Plan de Desarrollo Municipal se identificó la persistencia de actividades agropecuarias en toda la cuenca del Río Teusacá. Sin embargo, se ha logrado reducir la presencia de estas actividades, aunque se han detectado problemas relacionados con el asentamiento urbano en dicha área (Salnas Caicedo & Gonzalez Rodriguez, 2018).

De acuerdo con lo anterior, esto se puede ver reflejado en el aumento en la cobertura de tejido urbano continuo, que ha presentado un crecimiento de 6,7%, el valor más alto obtenido en la investigación. Adicionalmente, se presenta una disminución de 5,29% en la cobertura arbustal, esto se da debido a varios factores como lo son la expansión urbanística sin planeación, la invasión de la ronda hídrica, el cambio de uso del suelo debido a la transformación que se ha evidenciado de rural a urbano y el aumento de actividades terciarias como el

turismo, lo que ha generado que restaurantes reconocidos a nivel nacional decidan establecer sedes campestres a las afueras de Bogotá, en municipios como Sopó, buscando ofrecer una experiencia fuera de la ciudad, esto implica que se realice la tala de árboles con mayor intensidad.

Así mismo, este cambio en las actividades económicas favorece el crecimiento de la cobertura herbazal, la cual aumentó un 9,65 %, es posible que las actividades recreativas en Sopó y La Calera contribuyan al aumento de la cobertura herbazal debido a la presencia de zonas verdes y áreas naturales en estos sectores, que podrían propiciar el crecimiento de plantas herbáceas. Además, es posible que las actividades de turismo y recreación generen impactos en el suelo y la vegetación, como el pisoteo y la compactación del suelo, que pueden favorecer el establecimiento de especies herbáceas adaptadas a estas condiciones (Salnas Caicedo & Gonzalez Rodriguez, 2018).

2.3 Análisis del cambio de la cobertura

2.3.1 Tasa de cambio de cobertura natural (TCCN)

Para el cálculo del indicador de la tasa de cambio de la cobertura natural se empleó la *ecuación 2*. en donde se tomaron las áreas de cada cobertura para cada intervalo de años. También se realizó el cálculo del porcentaje de cambio para el periodo de tiempo completo de 19 años. Los resultados se registraron en las siguientes tablas:

Tabla 10. Tasa de cambio de cobertura natural (TCCN)

Tipo de cobertura vegetal	2001-2006 (%)	2006-2011 (%)	2011-2016 (%)	2016-2020 (%)
Tejido urbano discontinuo	-1%	2%	3%	7%
Mosaico de pastos y cultivos	1%	1%	2%	-9%
Herbazal	1%	1%	6%	10%
Cuerpos de agua artificiales	0%	0%	0%	0%
Pastos limpios	5%	-6%	-4%	-3%
Arbustal	-4%	3%	-7%	-5%

Fuente: Elaboración propia

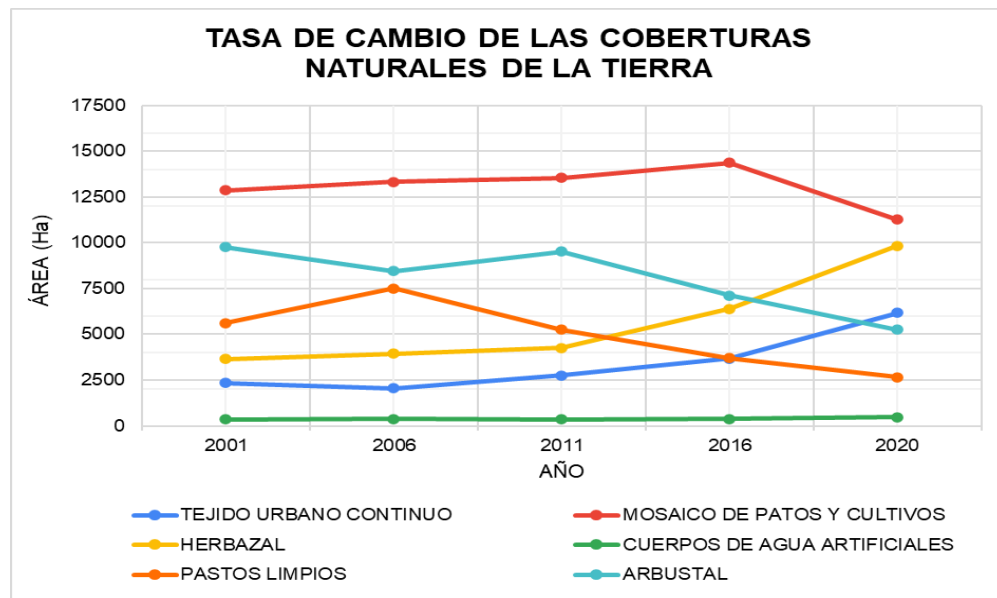
Tabla 11. Resultados de tasa de cambio de cobertura natural (TCCN)

Tasa de cambio de las coberturas naturales de la tierra (TCCN) AÑO 2001-2020	Área (HA) 2001	Área (HA) 2020	Porcentaje de cambio
Tejido urbano discontinuo	2352	6164	11%
Mosaico de pastos y cultivos	12854,2	11270	-4%
Herbazal	3644,2	9845	17%
Cuerpos de agua artificiales	350	486	0%
Pastos limpios	5621,2	2656	-8%
Arbustal	9768,2	5241	-13%

Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados se puede evidenciar que las coberturas que presentan mayores pérdidas en el transcurso de los años son arbustal, pastos limpios y mosaico de pastos y cultivos, en donde este último muestra un considerable decrecimiento en el último intervalo de años de análisis, mientras que el tejido urbano y herbazal presentan un constante aumento al pasar de los años, en donde este último presenta la mayor extensión del 17% con un aumento de 9845 ha. Por otro lado, los cuerpos de agua no presentan modificaciones. Con la gráfica que se muestra a continuación se puede observar mejor el comportamiento de las coberturas en este periodo de tiempo.

Gráfica 7. Tasa de cambio de cobertura natural (TCCN)



Fuente: Elaboración propia

6.3.2 Índice de vegetación remanente (IVR)

En las tablas 9. y 10. se muestran los resultados del índice de vegetación remanente de los años 2001 y 2020, en donde se tomó únicamente las coberturas herbazal y arbustal representando estas a la vegetación natural que allí se encuentra.

Tabla 12. Índice de vegetación remanente (2001)

2001			
Tipo de cobertura	Área (HA)	Porcentaje de cobertura	Categoría
Herbazal	3644,2	10,2	MT
Arbustal	9768,2	27,4	MT

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Índice de vegetación remanente (2020)

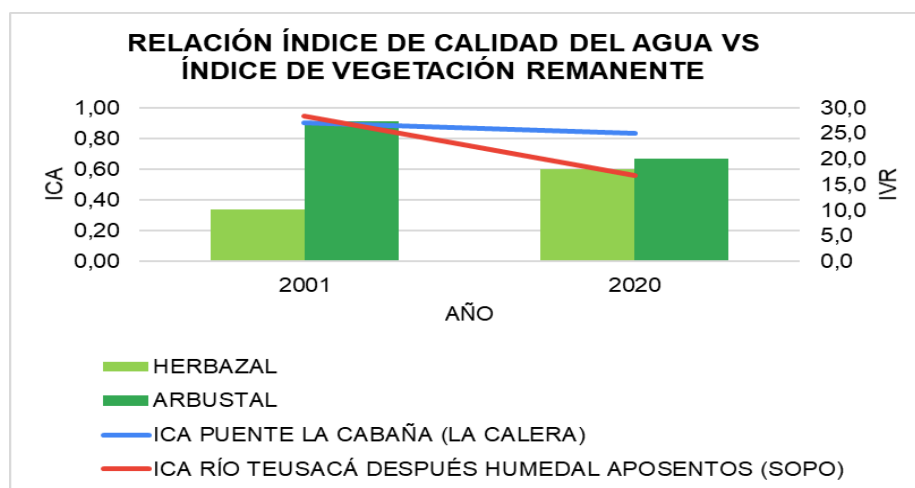
2020			
Tipo de cobertura	Área (HA)	Porcentaje de cobertura	Categoría
Herbazal	6403,4	18,0	MT
Arbustal	7128,4	20,0	MT

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, las coberturas se clasificaron como *Muy Transformado* (MT) por intervención antrópica y tal como se muestra, las áreas arbustales disminuyeron su extensión en el total del área de estudio un 7,4%, mientras que los herbazales aumentaron un 8%. Esto puede deberse a actividades como la restauración de áreas degradadas como pastizales sobreexplotados, terrenos baldíos o áreas afectadas por la erosión, en donde prácticas como la siembra de pasto, la protección de áreas vulnerables, así como la eliminación de especies invasoras y el manejo adecuado del pastoreo, pueden promover el crecimiento de áreas herbáceas (Martínez, 2001).

6.3.3 Tendencia del Índice de Vegetación Remanente (IVR) y el índice de Calidad del Agua (ICA)

Gráfica 8. Relación entre el Índice de Calidad del Agua y el índice de Vegetación Remanente



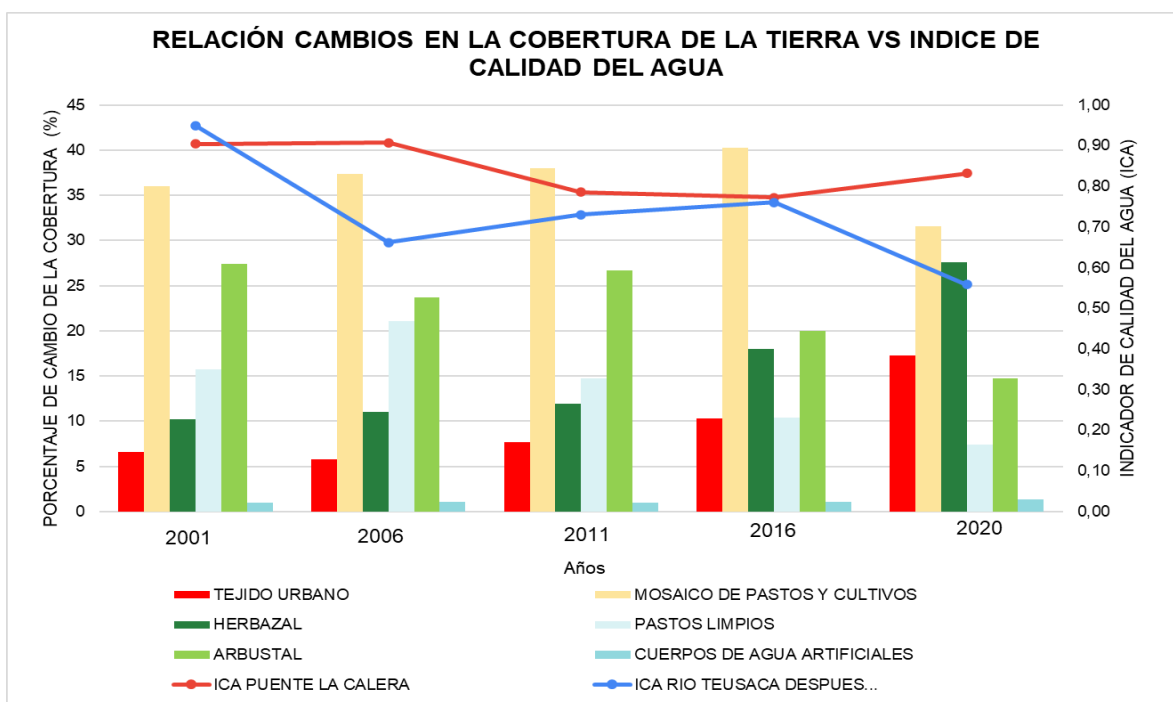
Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 8. presenta la relación entre el Índice de Calidad del Agua (ICA) y el Índice de Vegetación Remanente (IVR). En donde se puede observar que la variación entre las coberturas Herbazal y Arbustal a través del tiempo influyen en el cambio de la calidad del agua.

Del año 2001 al 2020 se presenta una disminución del 7,4 % en la cobertura Arbustal de acuerdo a la Tabla 13., al mismo tiempo que el ICA en la estación del Río Teusacá después de Humedal Aposentos pasa de tener un índice del 0,9 hasta un 0,6. El ICA de la estación Puente La Cabaña presenta una leve disminución pasando de un índice de 0,9 a 0,83. Esta diferencia en el comportamiento del ICA puede deberse a la cercanía que tiene la estación de monitoreo Río Teusacá después de Humedal Aposentos al Tejido urbano.

6.4 Análisis de la tendencia de la calidad del agua y el cambio de las coberturas de la tierra

Gráfica 9. Relación de cambios de la cobertura vegetal y calidad del agua



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 9. Se observa la relación entre las variaciones tanto de las coberturas vegetales aquí analizadas, como de los resultados de los índices de calidad de agua para cada estación según su municipio.

En primer lugar, se observa que en la estación Río Teusacá después del Humedal Aposentos (Sopó), del año 2001 al año 2006 se registró una considerable disminución del ICA de 0,95 a 0,66 respectivamente. Esto se debe a que para el año 2006, en el municipio de Sopó se encontraban 445 empresas, aportando así el 4,7% de las 9393 empresas con las que contaba la Provincia Centro (Cámara de Comercio de Bogotá, 2008). Adicional a esto, según un documento de diagnóstico de la cuenca hidrográfica del río Bogotá, realizado en el 2006 por la CAR Cundinamarca, para la cuenca del río Teusacá se encontró que había una fuerte presencia de empresas sin control ambiental, haciendo énfasis en que las industrias de las flores afectaban la calidad del agua de este río (CAR, 2006).

Ahora bien, como se puede observar en el año 2006 hay un aumento del mosaico de pastos y cultivos, que como se mencionó en los análisis anteriores, se debe al aumento en la producción de alimentos y cultivos de flores lo que pudo incrementar la generación de residuos de plaguicidas que este tipo de industrias causa, al igual que las fumigaciones que contaminan el agua subterránea de las tierras utilizadas. Al mismo tiempo se observa una disminución en la cobertura arbustal, lo que puede tener una connotación negativa debido a que los arbustales pueden actuar como una barrera natural que ayuda a filtrar los agroquímicos utilizados en estos cultivos, antes de que lleguen al agua del río. Cuando los arbustales disminuyen, hay menos vegetación para interceptar y retener los agroquímicos, lo que puede aumentar su lixiviación y transporte hacia el río a través de la escorrentía del agua de lluvia o riego, alterando así la calidad del recurso hídrico (INECOL, 2023).

Por otro lado, para el año 2011 parece que la calidad del agua se intenta regular en ambos puntos de muestreo, pero se puede observar una disminución en la estación Puente La Cabaña (La Calera), lo cual puede estar relacionado con la

disminución de los pastos limpios y el aumento del tejido urbano. Como anteriormente también se explicó, en este año la población se volvió más urbana provocando así que ciertos terrenos fueran destinados para construcciones o ganadería, en donde los pastos limpios se pudieron ver más afectados. De ser así, cuando los pastos son reducidos o eliminados debido a la actividad urbana, la erosión del suelo puede aumentar, lo que incrementa la carga de sedimentos en el agua del río (Cherlinka, 2022). Adicional a esto, según unos informes realizados por la CAR Cundinamarca en el año 2011, para los meses de abril y mayo los sectores aledaños al río Teusacá en el municipio de La Calera, presentaron inundaciones debido al desbordamiento del río y sus afluentes, como lo son las quebradas La Glorieta y Aguas Claras, esto en consecuencia a la temporada de lluvias que en ese momento se presentaba (CAR, 2011). Con esto el arrastre de sedimentos finos y materia orgánica con nutrientes aumenta, dando como resultado la disminución en la calidad del agua.

Para el año 2016, se puede ver que la calidad del agua en el área de estudio de La Calera disminuye nuevamente y por otro lado el mosaico de pastos y cultivos presenta el incremento más significativo en el periodo de tiempo establecido, en donde para ese año La Calera dedicó más del 50% de su territorio a la producción agrícola y ganadera, lo que puede significar que había un fuerte interés en incrementar la productividad por parte de los agricultores del municipio. Relacionado a esto, en ese mismo año la CAR Cundinamarca realizó un nuevo estudio tanto para el río Teusacá como para la quebrada La Nutria, debido al mal manejo de pesticidas que tuvieron los sembradores de papa de La Calera aledaños a estos cuerpos hídricos, provocando la contaminación del agua y por consiguiente la disminución en la calidad (RCN Radio, 2016). A parte de esto, se observa que la cobertura arbustal disminuyó, lo que pudo aportar a lo dicho anteriormente, debido a la falta de esta vegetación que ayuda a la retención de este tipo de agroquímicos para que no lleguen al río.

En el año 2020, se presenta un decrecimiento en la calidad del agua con un valor en el ICA de 0,56 catalogado como regular con respecto al municipio de Sopó después del Humedal Aposentos, al mismo tiempo que el tejido urbano tuvo el

mayor valor de crecimiento en comparación a los años anteriores, esto se relaciona debido a que el punto de muestreo es cerca al tejido urbano, y los resultados arrojaron la presencia de poco oxígeno disuelto, por lo que se podrían estar presentando descargas de aguas residuales en la zona.

Adicionalmente, se evidencia alta carga orgánica y sólidos suspendidos que se estarían presentando por el avance de la frontera agropecuaria, es por esto que el transporte de nitrógeno y fósforo pudo haber aumentado, debido al uso de abonos y/o pesticidas en áreas cercanas destinadas a cultivos, provocando que la calidad del agua del río se vea afectada de manera negativa.

Por otro lado, como se observa en la Gráfica 8. la cobertura herbazal presentó un gran aumento lo que puede producir una sobrecarga con nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, que contribuye a la degradación de la calidad del agua. La sobrecarga de nutrientes puede provocar el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, lo que conduce a la eutrofización y la disminución de la concentración de oxígeno en el agua (Salnas Caicedo & Gonzalez Rodriguez, 2018).

Sin embargo, es importante recalcar que en el punto de muestreo Puente La Calera, se tiene una calidad del agua aceptable, esto se debe en primer lugar a que la PTAR - La Calera, fue diseñada para eliminar el 90% de la carga orgánica del agua que recibe. Adicionalmente, el municipio de la calera adelanta programas de reforestación, monitoreo de calidad del agua y programas de educación ambiental para el cuidado de la subcuenca.

Por último, para el año 2020 la CAR Cundinamarca empezó a realizar obras de intervención en la cuenca del río Teusacá, en donde el objetivo principal del proyecto era la adecuación hidráulica del cuerpo de agua, mejorando su capacidad y evitando a futuro inundaciones que puedan afectar a las comunidades aledañas (Semana, 2021).

Aunque en un inicio la propuesta del proyecto suena favorable, en el momento de estar ejecutando las obras varios ciudadanos, ambientalistas y concejales evidenciaron el uso de maquinaria pesada para el levantamiento del material vegetal del lecho del río, junto con la considerable tala de árboles. Por lo cual se mostró una gran preocupación por la notoria desnaturalización del río.

Teniendo en cuenta esta información y la gráfica 8., se puede inferir que el descenso del ICA para este año también se debe a este tipo de obras, ya que al hacer la degradación de esta vegetación se pudo ver alterada la retención de sedimentos como arenas y limos, provocando el aumento de los sólidos suspendidos. Además de esto, el material vegetal aledaño a un río ayuda a detener la eutrofización por contaminantes traídos de zonas agrícolas por escorrentía (Silva Vásquez, 2017).

Por otro lado, para tener mayor claridad acerca del comportamiento de las variables y la correlación entre ellas por medio del Software SPSS se realizó un análisis estadístico por medio del método de correlación de Pearson, así mismo se aplicó el método de correlación de Spearman.

En la Tabla 14 y la Tabla 15. Se observan los resultados del análisis de correlación de Pearson y Spearman, en donde se tienen como variables los tipos de cobertura de la tierra presentes en la zona de estudio y los resultados correspondientes al Índice de Calidad del Agua (ICA).

Tabla 14. Correlación de Pearson

		Correlaciones								
		TEJIDO_URBANO_CONTINUO	MOSAICO_PASTOS_Y_CULTIVOS	HERBAZAL	CUERPOS_DE_AGUA_ARTIFICIALES	PASTOS_LIMPIOS	ARBUSTAL	ICA_PUENTE_LA_CALERA	ICA_RIO_TEUSACA_DESPUES_DE_HUMEDAL_APOSENTOS	
TEJIDO_URBANO_CONTINUO	Correlación de Pearson	1	-.661	.990**	-.420	-.890*	-.909*	-.409	-.624	
	Sig. (bilateral)		.225	.001	.481	.043	.033	.495	.261	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
MOSAICO_PASTOS_Y_CULTIVOS	Correlación de Pearson	-.661	1	-.607	.093	.370	.500	-.317	.422	
	Sig. (bilateral)	.225		.278	.882	.540	.392	.603	.479	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
HERBAZAL	Correlación de Pearson	.990**	-.607	1	-.326	-.860	-.959**	-.402	-.675	
	Sig. (bilateral)	.001	.278		.593	.062	.010	.503	.211	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
CUERPOS_DE_AGUA_ARTIFICIALES	Correlación de Pearson	-.420	.093	-.326	1	.748	.093	.617	-.309	
	Sig. (bilateral)	.481	.882	.593		.146	.882	.267	.613	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
PASTOS_LIMPIOS	Correlación de Pearson	-.890*	.370	-.860	.748	1	.729	.667	.298	
	Sig. (bilateral)	.043	.540	.062	.146		.162	.219	.626	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ARBUSTAL	Correlación de Pearson	-.909*	.500	-.959**	.093	.729	1	.317	.743	
	Sig. (bilateral)	.033	.392	.010	.882	.162		.604	.150	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ICA_PUENTE_LA_CALERA	Correlación de Pearson	-.409	-.317	-.402	.617	.667	.317	1	.217	
	Sig. (bilateral)	.495	.603	.503	.267	.219	.604		.726	
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ICA_RIO_TEUSACA_DESPUES_DE_HUMEDAL_APOSENTOS	Correlación de Pearson	-.624	.422	-.675	-.309	.298	.743	.217	1	
	Sig. (bilateral)	.261	.479	.211	.613	.626	.150	.726		
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia Software SPSS

Tabla 15. Correlación de Spearman

		Correlaciones								
		TEJIDO_URBANO_CONTINUO	MOSAICO_PASTOS_Y_CULTIVOS	HERBAZAL	CUERPOS_DE_AGUA_ARTIFICIALES	PASTOS_LIMPIOS	ARBUSTAL	ICA_PUENTE_LA_CALERA	ICA_RIO_TEUSACA_DESPUES_DE_HUMEDAL_APOSENTOS	
Rho de Spearman	TEJIDO_URBANO_CONTINUO	Coefficiente de correlación	1,000	-.100	.900*	.000	-1,000**	-.700	-.700	-.300
		Sig. (bilateral)	.	.873	.037	1,000	.	.188	.188	.624
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	MOSAICO_PASTOS_Y_CULTIVOS	Coefficiente de correlación	-.100	1,000	.000	-.100	.100	.100	-.600	.400
		Sig. (bilateral)	.873	.	1,000	.873	.873	.873	.285	.505
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	HERBAZAL	Coefficiente de correlación	.900*	.000	1,000	.400	-.900*	-.900*	-.600	-.600
		Sig. (bilateral)	.037	1,000	.	.505	.037	.037	.285	.285
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	CUERPOS_DE_AGUA_ARTIFICIALES	Coefficiente de correlación	.000	-.100	.400	1,000	.000	-.700	.300	-.800
		Sig. (bilateral)	1,000	.873	.505	.	1,000	.188	.624	.104
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	PASTOS_LIMPIOS	Coefficiente de correlación	-1,000**	.100	-.900*	.000	1,000	.700	.700	.300
		Sig. (bilateral)	.	.873	.037	1,000	.	.188	.188	.624
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	ARBUSTAL	Coefficiente de correlación	-.700	.100	-.900*	-.700	.700	1,000	.300	.700
		Sig. (bilateral)	.188	.873	.037	.188	.188	.	.624	.188
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	ICA_PUENTE_LA_CALERA	Coefficiente de correlación	-.700	-.600	-.600	.300	.700	.300	1,000	-.200
		Sig. (bilateral)	.188	.285	.285	.624	.188	.624	.	.747
		N	5	5	5	5	5	5	5	5
	ICA_RIO_TEUSACA_DESPUES_DE_HUMEDAL_APOSENTOS	Coefficiente de correlación	-.300	.400	-.600	-.800	.300	.700	-.200	1,000
		Sig. (bilateral)	.624	.505	.285	.104	.624	.188	.747	.
		N	5	5	5	5	5	5	5	5

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia Software SPSS

Los resultados de estos análisis estadísticos muestran que la correlación entre las variables del índice de Calidad del Agua (ICA) y las coberturas de la tierra no es significativa, lo que quiere decir que no es lo suficientemente fuerte estadísticamente, debido a que el análisis anterior se basa en un análisis de varianza, lo que quiere decir es que la relación se basa en cuan mayor o menor sea su variación.

Cuando el coeficiente de correlación es negativo esto indica que la relación es inversa, al mismo tiempo que si este es positivo indica que la relación es igual. Este tipo de comportamiento de las variables con respecto a su correlación se puede clasificar entre Alta, Medio o Baja. Si la correlación es mayor a 0,7 esta será Alta, si está entre 0,7 y 0,4 su correlación es media y si se encuentra por debajo de 0,4 es baja.

6.5 Análisis de información primaria obtenida de encuesta estructurada

En el ANEXO 7. Se muestran las respuestas que dieron los residentes de Sopó y La Calera a una encuesta formulada con el fin de conocer su punto de vista con respecto a la calidad del agua del río Teusacá y de las coberturas del suelo que pudieran reconocer. La encuesta fue realizada a 25 residentes de La Calera y 25 residentes de Sopó, para tener un total de 50 respuestas.

Para obtener respuestas homogéneas se presenta la siguiente escala para las respuestas 6. y 7. relacionados con la percepción del estado del Río Teusacá

- **Bueno:** La zona se encuentra sin intervención humana o con una intervención muy baja que apenas se puede notar de manera visible. Los hábitats naturales están bien conservados, con una diversidad de flora y fauna acuática. No hay evidencia de contaminación, como residuos visibles, olores desagradables o espuma excesiva.
- **Regular:** Existe cierta intervención humana en la zona, pero no es demasiado intensa. Algunas áreas pueden mostrar signos de alteración,

como construcciones o presencia de pequeñas cantidades de residuos. La diversidad de flora y fauna acuática puede estar ligeramente comprometida, pero aún se observa cierta vida en el río. Puede haber ciertos niveles de contaminación, pero no son tan pronunciados como para considerar el estado del río como malo.

- **Malo:** La intervención humana es alta y causa un impacto significativo en el ecosistema del río. Las áreas naturales están fuertemente alteradas o degradadas, con presencia de infraestructuras o construcciones que afectan negativamente al entorno. La diversidad de flora y fauna acuática es limitada o inexistente debido a la contaminación o destrucción del hábitat. Hay evidencia clara de contaminación, como residuos visibles, olores desagradables y espuma excesiva.

Para las respuestas 8. y 9. en relación al estado de las coberturas de la tierra en la cuenca del Río Teusacá se presenta la siguiente escala de evaluación

- **Buena:** La cobertura de la tierra en la cuenca está mayormente compuesta por áreas naturales no perturbadas, como bosques, praderas o humedales. Hay una diversidad de hábitats y ecosistemas saludables presentes. No hay signos evidentes de degradación de los paisajes naturales.
- **Regular:** Existe cierta intervención humana en la cuenca, pero no es extensiva ni causa una degradación severa de la cobertura de la tierra. Puede haber áreas de uso agrícola, pastizales gestionados o zonas urbanizadas de baja densidad. Se observa una cierta diversidad de paisajes, aunque algunos pueden estar alterados.
- **Mala:** La cobertura de la tierra en la cuenca está altamente degradada o dominada por actividades humanas intensivas. Los ecosistemas naturales se han visto significativamente alterados o reemplazados por áreas urbanas, agricultura intensiva o infraestructuras. Existe una degradación severa de los paisajes naturales, lo que dificulta la conectividad entre hábitats.

Con respecto a la primera y segunda pregunta se les preguntó en cuál de los dos municipios se encontraban y a cuál de las veredas pertenece, en donde más del 50% de los encuestados respondió que pertenecían a otras veredas que no se encontraban en la encuesta, pero que hacen parte de los municipios de Sopó o La Calera.

Para la tercera pregunta se puede observar que el 64% de los encuestados reside y trabaja en alguno de los municipios, mientras que el 36% solamente son residentes, lo cual da una idea que este grupo de personas está familiarizado con el río y las coberturas que allí se encuentran. Además, se les preguntó cuánto tiempo llevaban en el municipio, en donde la mayoría (66%) llevaban más de 15 años en el respectivo municipio y un 22% estaban de 5 a 15 años, lo que podía contribuir a obtener puntos de vista de años más atrás. De igual forma no se descartaron a quienes llevaban de 3 a 5 años (10%) y menos de 3 años (2%).

Para la sexta pregunta se quiso indagar el punto de vista que tenían con respecto a la calidad del agua para cualquier tipo de actividad que la aprovecharan, en donde el 68% y 24% respondieron que la encontraban entre regular y mala, mientras que solo el 8% aseguraron que si era buena. Con esto se les hizo la misma pregunta, pero en un contexto de hace 10 años o más, a lo que el 66% coincidió que era buena y un 34% dijo que regular, lo que da a entender que los residentes de ambos municipios perciben una disminución en la calidad del agua que allí usan.

Por otro lado, se quiso saber su opinión con respecto a la calidad actual de los distintos tipos de coberturas que allí encuentran, en donde la mayoría coincidió en que se encontraba entre media (65%) y baja (22%), mientras que un 12% dijo que alta. Al hacerles la misma pregunta para años anteriores, el 64% dijo que era alta, un 26% dijo media y solo un 10% dijo baja. En ambos contextos, los residentes resaltaban la considerable deforestación y desnaturalización de varias zonas para construcciones y/o urbanizaciones.

Por último, se les preguntó si notaban fuertes cambios tanto en la calidad del agua, como en el estado de las coberturas, a lo que el 88% respondió que sí, mientras un 12% dijo que no, lo que confirma nuevamente que, en el transcurso de al menos 10 años, la mayoría de los residentes está consciente del cambio en la calidad de ambos recursos.

Adicional a esto, se le pidió a los encuestados proponer desde su propio criterio, actividades o proyectos para mejorar el estado del recurso hídrico y del suelo. Debido a la variedad de respuestas estas se verán registradas en el ANEXO 7.

Esta encuesta se realizó con el fin de indagar el punto de vista de los residentes de estos municipios con respecto al estado de la calidad del agua del río Teusacá, como de las diferentes coberturas del suelo que lo conforman. Para de esta forma convalidar los cambios que se presentaron anteriormente en los resultados obtenidos a lo largo del periodo de tiempo establecido para ambos parámetros. Al mismo tiempo estas respuestas se tendrán en cuenta para la formulación del plan de acción que se planteará a continuación.

6.6 Propuesta de plan de acción para mejora en la calidad del agua de la subcuenca del río Teusacá

Teniendo en cuenta los análisis de los resultados anteriores y las respuestas de los residentes encuestados, a continuación, se propone un plan de acción con el fin de que la calidad del agua del río se pueda conservar y mejorar.

1. *Monitoreo del agua y de las coberturas del suelo cercanas al río Teusacá:* Las autoridades ambientales como la CAR Cundinamarca, el Acueducto PROGRESAR ESP y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible deben implementar programas de monitoreo constante del agua del río Teusacá para aumentar los parámetros que se deben monitorear cómo los niveles de contaminantes, incluyendo nutrientes, sedimentos, metales pesados y otros contaminantes químicos, así como del estado de las coberturas del suelo en la cuenca, para analizar los datos recopilados e identificar las principales fuentes de contaminación y establecer medidas de mitigación. Por otro lado, incluir dos estaciones de monitoreo en la parte alta de la subcuenca, y una adicional entre la estación Puente La Calera y Río Teusacá después de Humedal Aposentos, con el fin de tener mayor información acerca del comportamiento de toda la subcuenca.

2. *Conservación y restauración de las coberturas del suelo:* Implementar programas de conservación y restauración de coberturas del suelo en la cuenca del río Teusacá, incluyendo la reforestación de zonas boscosas, la restauración de ecosistemas naturales, el manejo sostenible de suelos y la protección de zonas de recarga hídrica. Con estas actividades reducen la erosión del suelo, filtran contaminantes y al mismo tiempo, mejoran la calidad del agua.

3. *Control de prácticas agrícolas:* Implementar buenas prácticas en suelos agrícolas cercanos al río, incluyendo la rotación de cultivos, la siembra directa, la reducción de agroquímicos y la aplicación adecuada de fertilizantes y pesticidas. Esto contribuye a la prevención de enfermedades del suelo, problemas de plagas y malezas, y de esta forma establecer suelos sanos (Rex Dufour, 2015). Además de esto, hacer uso de sistemas de riego eficientes para reducir la escorrentía de nutrientes y contaminantes hacia el río. Para fomentar las buenas prácticas sostenibles entre los agricultores locales se puede hacer a través de capacitaciones y apoyo técnico por parte de entes gubernamentales y/o autoridades ambientales.

4. *Tratamiento de aguas residuales:* Hacer continuo monitoreo en las plantas de tratamiento de aguas residuales que se encuentran en ambos municipios, para así tener seguridad de que cumplen con los estándares establecidos por la normativa con respecto a los vertimientos que se hacen al río. Además de esto asegurarse que las plantas cuentan con tecnologías óptimas para el correcto tratamiento de estas aguas, junto con la implementación de planes para la reutilización del agua tratada para usos no potables.

5. *Manejo adecuado de los residuos sólidos:* Ejecutar y hacer seguimiento a un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) que incluya la correcta recolección, clasificación, reciclaje y disposición final de los residuos. Además de esto, que con este plan se elimine la disposición de residuos al cuerpo de agua, promovido por la gestión ambiental de prevención para las empresas y los ciudadanos de los municipios.

6. *Educación y concientización:* Realizar campañas de educación y concientización dirigidas a la comunidad local, empresas y agricultores sobre la importancia del manejo adecuado de estos recursos naturales, donde se promueva la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos sólidos, junto con el uso óptimo del agua para minimizar los impactos que se generen al recurso hídrico y a los suelos. Adicionalmente, que por medio de organizaciones comunitarias, instituciones educativas y otros actores locales promuevan la participación ciudadana en la toma de decisiones y acciones para la mejora de la calidad del agua.

7. *Regulación y cumplimiento de las normativas ambientales:* Fortalecer y hacer cumplir la regulación ambiental existente, incluyendo normativas relacionadas con el manejo de coberturas del suelo y la contaminación agrícola. Al mismo tiempo establecer sanciones y medidas correctivas para quienes incumplan con las normas ambientales, y asegurar una supervisión adecuada de las actividades humanas en la cuenca.

3. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta que las comunidades de Sopó y La Calera utilizan el agua de este río como fuente de abastecimiento en actividades domésticas, agrícolas y pecuarias, el presente proyecto tendrá un impacto social debido a que se aportará conocimiento con respecto al estado del cuerpo hídrico, lo cual genera que estas comunidades tengan una idea más real del estado en que se encuentra esta fuente de agua, y así mismo dar un sentido de pertinencia e incentivar a la conservación de la cuenca.

Por otro lado, este tipo de investigaciones contribuyen a la comunidad al momento de presentar inconvenientes con la naturaleza del río por intervenciones de proyectos que se realicen dentro de este. Además, permiten percibir el deterioro de la cobertura vegetal, y así poder mejorar la administración del uso de los recursos vegetales.

A su vez, son una fuente de información para los estudios ambientales que allí se realicen y aporta a la toma de decisiones de las entidades que estén a cargo de la investigación o del proyecto planeado. Finalmente, al proponer un plan de manejo del río Teusacá, se puede mejorar la calidad de vida de la comunidad y garantizar la conservación del ecosistema.

4. CONCLUSIONES

El análisis multitemporal demuestra la transformación de la subcuenca del río Teusacá, debido a la gran intervención antrópica que se ha presentado a través de los años, la cual se ha visto fuertemente influenciada por el interés en el crecimiento económico y urbano en los municipios de Sopó y La Calera, lo que ha generado que actividades como la remoción de la capa vegetal y la deforestación para aumentar sectores ganaderos y de urbanización, sea la principal causa de la alteración a la vegetación que hace parte de la subcuenca.

Esto se evidencia en las Tasas de Cambio de las Coberturas Naturales, en donde se muestra que la cobertura arbustal presentó una disminución del 13% entre el año 2001 y 2020, al igual que en el Índice de Vegetación Remanente, el cual refleja una pérdida del 7,4 % de la vegetación arbustal y un aumento de 8% en la cobertura herbazal, determinando así que la subcuenca en relación a las coberturas naturales se encuentra Muy transformada con sostenibilidad baja.

Esta pérdida de la cobertura arbustal en la zona de estudio, en especial cercana a la ronda del río Teusacá, genera una disminución en la capacidad de infiltración del suelo, dado que las raíces de los arbustos permiten infiltrar el agua lluvia y/o el agua por escorrentía, que trae consigo sedimentos, nutrientes, pesticidas y materia orgánica provenientes de las actividades agropecuarias presentes en la zona y junto con el constante crecimiento de las áreas de los mosaicos de pastos y cultivos, generan un aumento en las descargas directas a la fuente hídrica, alterando la calidad del agua del mismo.

Es por esto que el Índice de Calidad de Agua (ICA) en la temporalidad del estudio fluctúa entre aceptable, buena y regular, en donde en el punto de muestreo Puente La Calera, la calidad del agua se encuentra entre aceptable y buena, mientras que en Río Teusacá después de Humedal Aposentos, correspondiente al municipio de Sopó se encuentra en mayor medida como regular y aceptable. Esto también puede ser atribuido al fuerte asentamiento de sectores industriales que se lleva presenciando desde el año 2006 en el municipio, las cuales realizan vertimientos al cuerpo hídrico, dando como resultado este comportamiento de la calidad del agua en el área.

Por otro lado, al realizar las visitas de campo e interactuar con la comunidad de los municipios por medio de las encuestas, se logró observar que la mayor parte de la comunidad si tiene conocimiento e interés con respecto al cuidado del río, ya que han evidenciado el deterioro de la calidad del agua del cuerpo hídrico y de las coberturas de la tierra a través de los años. Por lo tanto, las respuestas de la encuesta fueron una de las principales bases para la formulación del plan de acción anteriormente propuesto.

5. RECOMENDACIONES

Para próximas investigaciones se recomienda obtener más puntos de muestreo de calidad de agua, para de esta forma poder hacer un mejor seguimiento de este índice a lo largo del río y al mismo tiempo proporcionar un análisis más detallado al respecto.

Por otro lado, con respecto a las imágenes satelitales, se recomienda que se amplíe la búsqueda en otras fuentes ya que la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos no siempre es la más recomendable. Además, si se va a hacer algún tipo de procesamiento a las imágenes por vacíos existentes, ya sean por nubes o por errores del satélite, se recomienda utilizar un programa más óptimo para este tipo de ajustes, ya que se puede alterar la información adjunta en la imagen, afectando al mismo tiempo los análisis a realizar.

También se recomienda aumentar el rango temporal entre los años elegidos a analizar, para que de esta forma poder observar de mejor manera los cambios en las coberturas. Al mismo tiempo es recomendable ampliar el rango de coberturas a estudiar al usar la metodología Corine Land Cover, para así tener más información al momento de analizar los mapas de cambios en las coberturas vegetales.

6. REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal de Sopó. (2020). *Diagnostico Plan de Desarrollo Municipal*. Recuperado 1 de marzo de 2023, de <https://www.sopocundinamarca.gov.co/loader.php?IServicio=Documentos&ITipo=viewpdf&id=1040&idCategoria=56>
- Alcaldía Municipal de Sopó. (2023). Plan de desarrollo para Sopó 2016 [Conjunto de datos].
- Andrade Florez, J. E. (2020). *Actualización del perfil ambiental del municipio de La Calera Cundinamarca* [Tesis]. Universidad Santo Tomás.
- Arevalo Parra, D.A. (2021). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y la degradación en la extensión de la cobertura de páramo – subcuenca San José - Páramo El Rabanal* (Tesis pregrado). Universidad Santo Tomás, Tunja.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33722/2021duvanarevalojuanuarde.pdf?sequence=1>
- Barrera, D. F. & Chaparro J. D. (2021). *Análisis del cambio de las coberturas vegetales y su relación con las variables hidrológicas en el río morro, ubicado en el municipio de monguí departamento de Boyacá*. (Tesis pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/46087/2022dianabarreira.pdf?sequence=1>
- Barreto-Martin, C., Sierra-Parada, R. J., Rivera, D. S. C., Jaramillo-Londono, A., & Mesa-Fernández, D. (2021). Spatio-temporal analysis of the hydrological response to land cover changes in the sub-basin of the Chicú river, Colombia. *Heliyon*, 7(7), e07358.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07358>
- Blanco, J. (2017). *Bosques, suelo, agua y sus interacciones*. *Ecosistemas*, 26(2),1-9. <https://doi.org/10.7818/ecos.2017.26-2.01>
- Bordino, J. (2021). *Erosión fluvial: qué es, tipos, consecuencias y ejemplos*. *EcologíaVerde.com*. <https://www.ecologiaverde.com/erosion-fluvial-que-es-tipos-consecuencias-y-ejemplos-3333.html#:~:text=Qu%C3%A9%20es%20la%20erosi%C3%B3n%20fluvial%20y%20sus%20caracter%C3%ADsticas,-Para%20dar%20inicio&text=Podemos%20decir%20que%20este%20tipo,u%20otra%20corriente%20de%20agua>
- Caleño Ortiz, L. N., & Toro Figueredo, W. Y. (2018). *Evaluación de la huella hídrica del río Teusacá, subcuenca de la cuenca alta del río Bogotá* [Tesis]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2008). *Caracterización económica y empresarial de las provincias de cobertura de la CCB, Sabana Centro*. Bogotá D.C: Cámara de Comercio de Bogotá.
<https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/2891>

- Carrero Niño, L. (2012) *Reconstrucción histórica e interpretación de los procesos de transformación en el uso y manejo del paisaje en la cuenca alta del río Teusacá, Bogotá, Cundinamarca*. Tesis.
- Cherlinka, V. (2022). *Erosión Del Suelo: Tipos, Cómo Evitarla Y Controlarla*. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/erosion-del-suelo/>
- Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca. (2006). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BOGOTÁ*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>
- Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca. (2011). *Informe Institucional - La Calera 0414*. https://www.car.gov.co/uploads/files/informeInstitucional0414_03Mayo2011.pdf
- Corporación Autónoma Regional. (2021). *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Teusacá - 2120-13*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25d4c03bce.pdf>
- Corporación Autónoma Regional. (2023). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica del río Bogotá subcuenca del río Teusacá – 2120-13*. En Corporación Autónoma Regional. Recuperado 5 de febrero de 2023, de <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25d4c03bce.pdf>
- CORNARE. (2023). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Nare*. https://www.cornare.gov.co/POMCAS/planes-de-ordenacion/DocumentosFasesNare/Diagnostico/Capitulo4.Caracterizacion-fisico-biotica/4.11_Coberturas.pdf
- da Silva e Silva, R., Blanco, C.J.C., da Silva Cavalcante, I.C. et al. (2020). *Relationship between water quality parameters and land use of a small Amazonian catchment*. *Sustain. Water Resour. Manag.* 6, 65.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2007). *FICHA TÉCNICA Sistema de Información del Medio Ambiente - Oxígeno disuelto*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Odisuelto.pdf>
- Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). (2023.). *Parámetros Organolépticos*. http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf
- Florida Keys National Marine Sanctuary. (2022). *Water quality describes the condition of the water, including chemical, physical, and biological characteristics, usually with respect to its suitability for a particular purpose such as drinking or swimming*. National Marine Sanctuaries. <https://floridakeys.noaa.gov/ocean/waterquality.html>
- Garay Rey, K.M. (2019). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la subcuenca del Río Teusacá con imágenes Landsat de los años 1985, 1997 y 2015*. (Tesis de pregrado). ¿Universidad Santo Tomás, Bogotá <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/20690/2019KarenGaray.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- González. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos (gapfilling) de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+*. (Tesis maestría). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Jalisco. <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/5723/Desarrollo%20de%20una%20aplicaci%C3%B3n%20para%20la%20reparaci%C3%B3n%20de%20huecos%20gapfilling%20de%20im%C3%A1genes%20satelitales%20Landsat%207%20ETM.pdf?sequence=4&isAllowed=y#:~:text=En%20el%20a%C3%B1o%202002%20el,menos%2022%25%20%5B14%5D>
- Gualdrón, L. E. (2016). *Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros físico químicos y biológicos*. Universidad Libre, Santander. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/4593/3916>
- Guía para la medición en campo de calidad del agua | HANNA Instruments Colombia. (s. f.). <https://www.hannacolombia.com/blog/post/190/guia-para-la-medicion-en-campo-calidad-del-agua>
- Gutierrez, Y. E. (2021). *Implementación de la metodología corine land cover para generación de la capa geográfica de coberturas de la tierra del año 2019, escala 1:25000, a partir de imágenes satelitales planetscope para la jurisdicción de Corpochivor*. (Tesis pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28855/GutierrezMoraYahiraElizabeth2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto de Ecología A.C. (INECOL). (2023). *La función de la vegetación ribereña y la calidad de los ríos*. Inecol.mx <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-ciencia-hoy/1014-la-funcion-de-la-#:~:text=Al%20retener%20el%20agua%2C%20la,a%20las%20corrientes%20de%20agua>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2007). *Metodología Corine Land Cover - IDEAM. MONITOREO DE SUELOS Y COBERTURAS DE LA TIERRA*. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover#:~:text=La%20base%20de%20datos%20de,de%20cobertura%20a%20diferentes%20escalas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2012). *Coberturas de la tierra - IDEAM. ECOSISTEMAS*. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra#:~:text=La%20%22Cobertura%22%20de%20la%20tierra,otras%20superficies%20terrestres%20como%20afloramientos>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2013). *Hoja metodológica del indicador Promedio de oxígeno disuelto por estación (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. 7p.*
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2020). *Hoja metodológica del Promedio del Potencial de Hidrógeno (PpH) (Versión 1,1). 7 p*

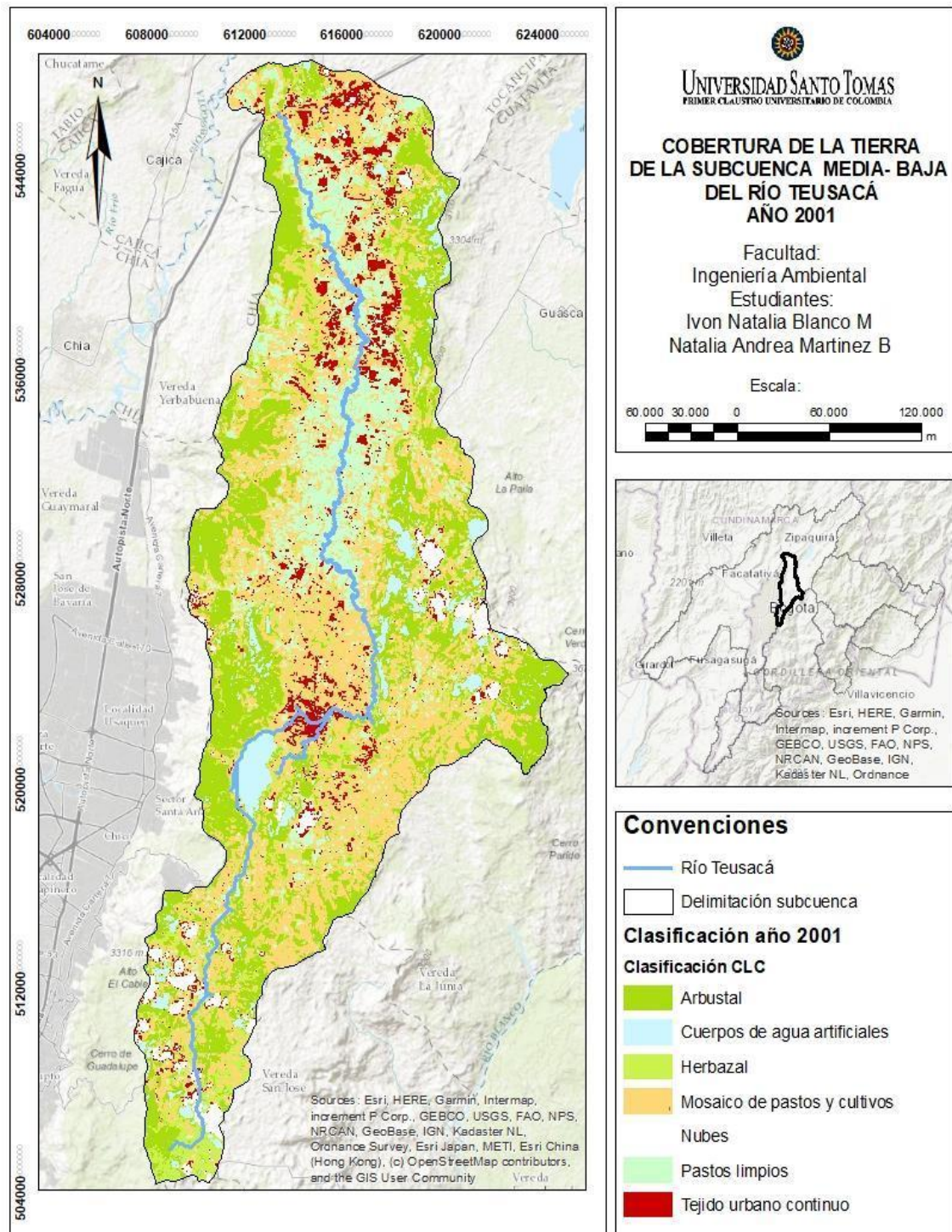
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (2021). *INDICADORES – AGUA*. GOV.CO. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (2022). *Metodología corine land cover*. GOV.CO. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (2022). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. 10 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2023). *Calibración radiométrica y Corrección atmosférica*. Protocolo De Procesamiento Digital De Imágenes Para La Cuantificación De La Deforestación En Colombia Nivel Subnacional -Escala Gruesa Y Fina. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022108/PARTE2.pdf>
- J. Y. Lee, J. S. Yang, D. K. Kim, M. Y. Han, (2010). *Relationship between land use and water quality in a small watershed in South Korea*. *Water Sci Technol*; 62 (11): 2607–2615. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.498>
- Londoño, A. M. J., Sierra, R., Lopez, L. S., & Carrillo, K. (2018). Análisis de las condiciones fisicoquímicas de calidad del agua del humedal el Resbalón como herramienta. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/322991844_Analisis_de_las_condiciones_fisicoquimicas_de_calidad_del_agua_del_humedal_el_Resbalon_como_herramienta_para_la_gestion_del_mismo_dirigido_a_la_conservacion_y_preservacion_de_flora_y_fauna
- Martínez, J. A. (2001). *Dinámica sucesional tras el abandono y recuperación del matorral mediante pastoreo controlado. Experiencia en un sector de la montaña de León*. Universidad de Lleida, España. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=7225>
- Martínez, S & Barrero, I (2018). *Evaluación de las condiciones de calidad del agua, para la formulación de estrategias de aprovechamiento y conservación de la microcuenca quebrada La Argentina, Villavicencio – meta*. (Tesis). Universidad Santo Tomás, Villavicencio. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12064/2018santiagomartinez.pdf?sequence%3D1&isAllowed%3Dy>
- Minambiente, (2021). *Gestión Integral del Recurso Hídrico*. GOV.CO. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>.
- Minambiente, (2021). *Calidad del agua*. GOV.CO. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad>

- Montenegro Valle, D. F. (2017). *Análisis de la evolución del valor agregado del municipio de Sopó* [Tesis]. Universidad de la Sabana.
- Omnium, A. G. (2018). *La importancia del agua para el desarrollo sostenible* *Revista Aguas. Actualidad Global Omnium.*
<https://actualidad.globalomnium.com/la-importancia-del-agua-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Moyano A. J., Cuadros, F. D., Pabón, A. M., & Trujillo, J. V. (2021). *Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos ilegales del municipio de Villavicencio, Colombia.* Scielo.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2021000200043
- Orjuela, L. C. (2013). *Promedio de Sólidos Suspendidos Totales (PSST).* Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM.
<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/646961/3.19+Hoja+Metodol%C3%B3gica+S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales.pdf/46645e7a-8722-42ff-937b-1acebb404f5c>
- Quiroz, H. O. A. C. (2010). *Leyenda Nacional De Coberturas De La Tierra. Metodología Corine Land Cover Adaptada Para Colombia. Escala 1:100000.* ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/303960063_LEYENDA_NACIONAL_DE_COBERTURAS_DE_LA_TIERRA_METODOLOGIA_CORINE_LAND_COVER_ADAPTADA_PARA_COLOMBIA_ESCALA_1100000
- Ramirez, L. (2013). *Instructivo para el diligenciamiento de la información en plantillas Excel - REGISTRO DE FUENTES HÍDRICAS.* Bogotá Colombia.
<http://sirh.ideam.gov.co/Sirh/pages/Instructivo%20Registro%20de%20Fuentes.pdf>
- RCN Radio. (2016). *CAR investiga mal manejo de pesticidas que contaminó la quebrada La Nutria.* RCN Radio. <https://www.rcnradio.com/medio-ambiente/car-investiga-mal-manejo-de-pesticidas-que-contamino-la-quebrada-la-nutria>
- Resolución 2115 de 2007 (Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial). Por la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 27 de junio de 2007
- Rodriguez, C. H. (2007). *Demanda química de oxígeno por refluo cerrado y volumetría.* Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM.
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- Rex Dufour. (2015). *Hoja de Datos: Rotación de Cultivos en Sistemas Agrícolas Orgánicos.* ATTRA Agricultura Sostenible.
<https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/FINAL%20Rotacion%20de%20Cultivos%20en%20Sistemas%20Agricolas%20Organicos.pdf>

- Rodríguez, C. I., Duque, C., Calvache, M. L., & López, M. (2010). *Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña*, España. Sociedad Geológica., 5.
- Salinas Caicedo, A., & Gonzalez Rodriguez, D. A. (2018). *Propuesta ambiental para el plan de desarrollo del municipio de La Calera, Cundinamarca para el Periodo 2020-2024*. Universidad Piloto de Colombia.
- Semana. (2021). ¿La CAR va a canalizar el río Teusacá? *Semana.com Últimas Noticias de Colombia y el Mundo*. <https://www.semana.com/impacto/articulo/no-vamos-a-canalizar-al-rio-teusaca-car-colombia-hoy/53569/>
- Silva Vásquez, A. L. (2017). *Influencia de la vegetación ribereña en la calidad del agua en la cuenca del río Mashcón-Cajamarca* [Tesis]. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Tasumi, M., Kramber, Morse, Wilkins, M., & Allen. (2003). *Preliminary computation of evapotranspiration by land cover type using Landsat TM data and SEBAL*. IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1294644>
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). (2020). *Segunda temporada de lluvias año 2020 - Colombia*. ReliefWeb. <https://reliefweb.int/report/colombia/segunda-temporada-de-lluvias-o-2020>
- Villegas, J. (2004). *Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el departamento de Antioquia*. EIA, (1), 73-79.

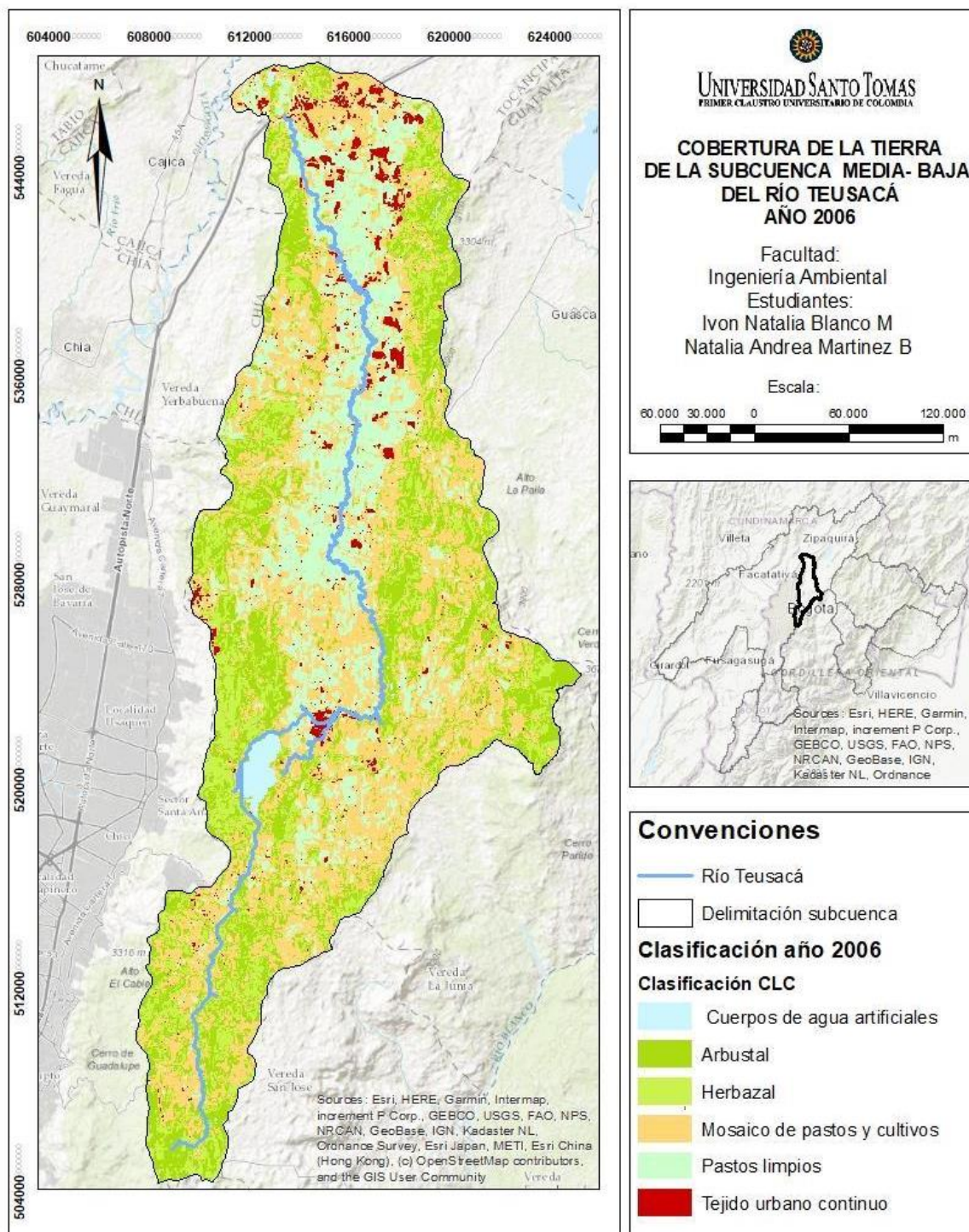
7. ANEXOS

ANEXO 1. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2001.



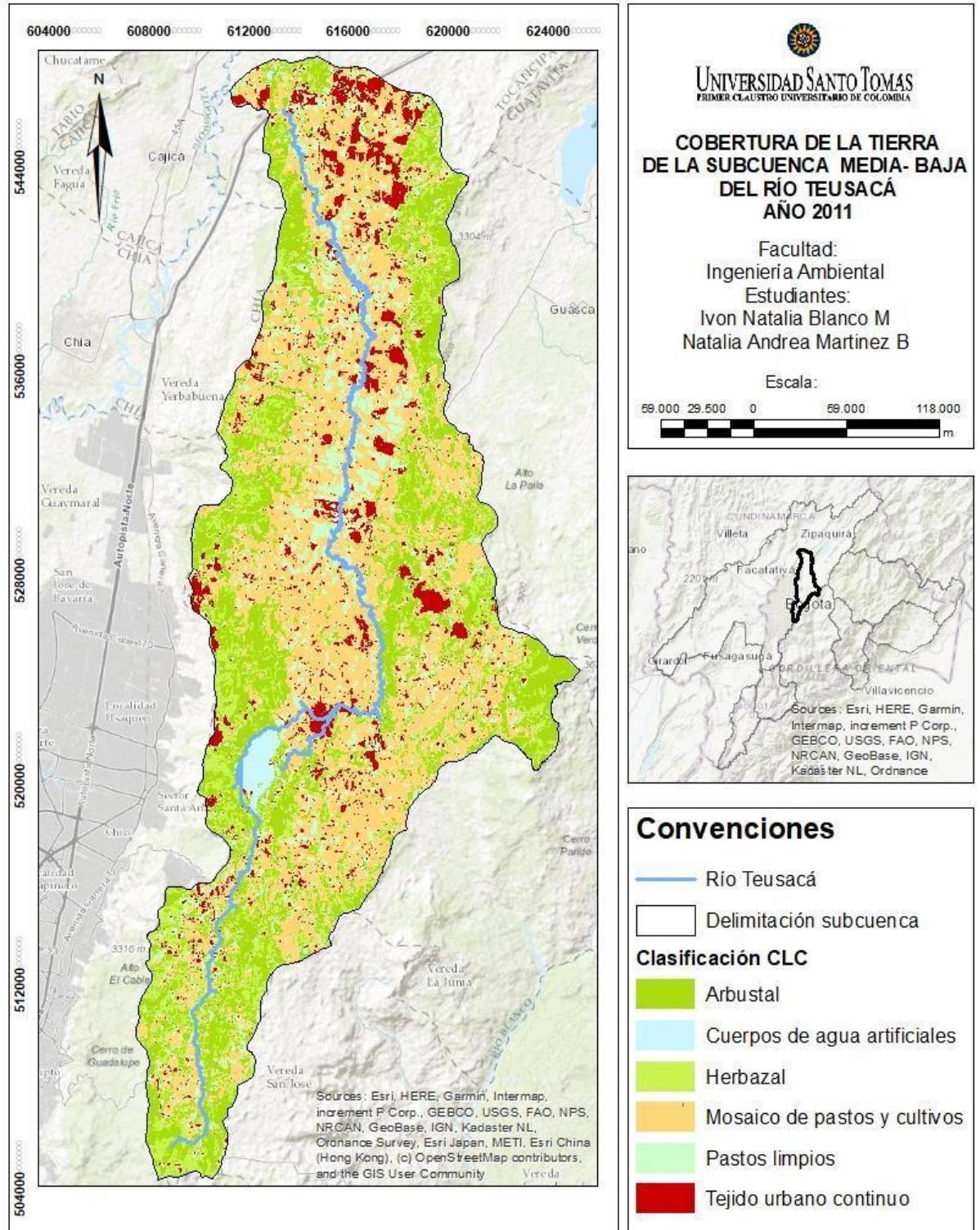
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2006.



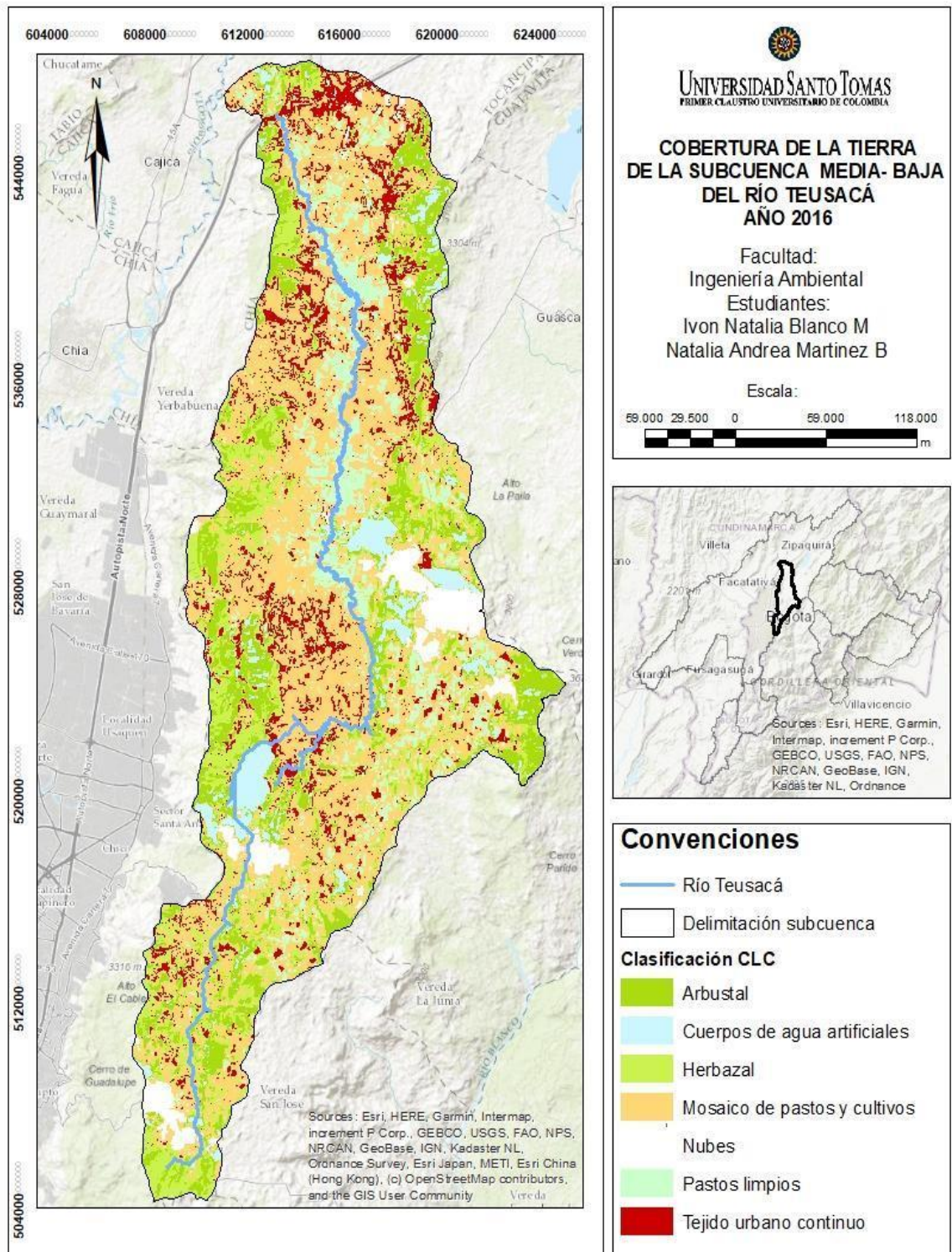
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2011.



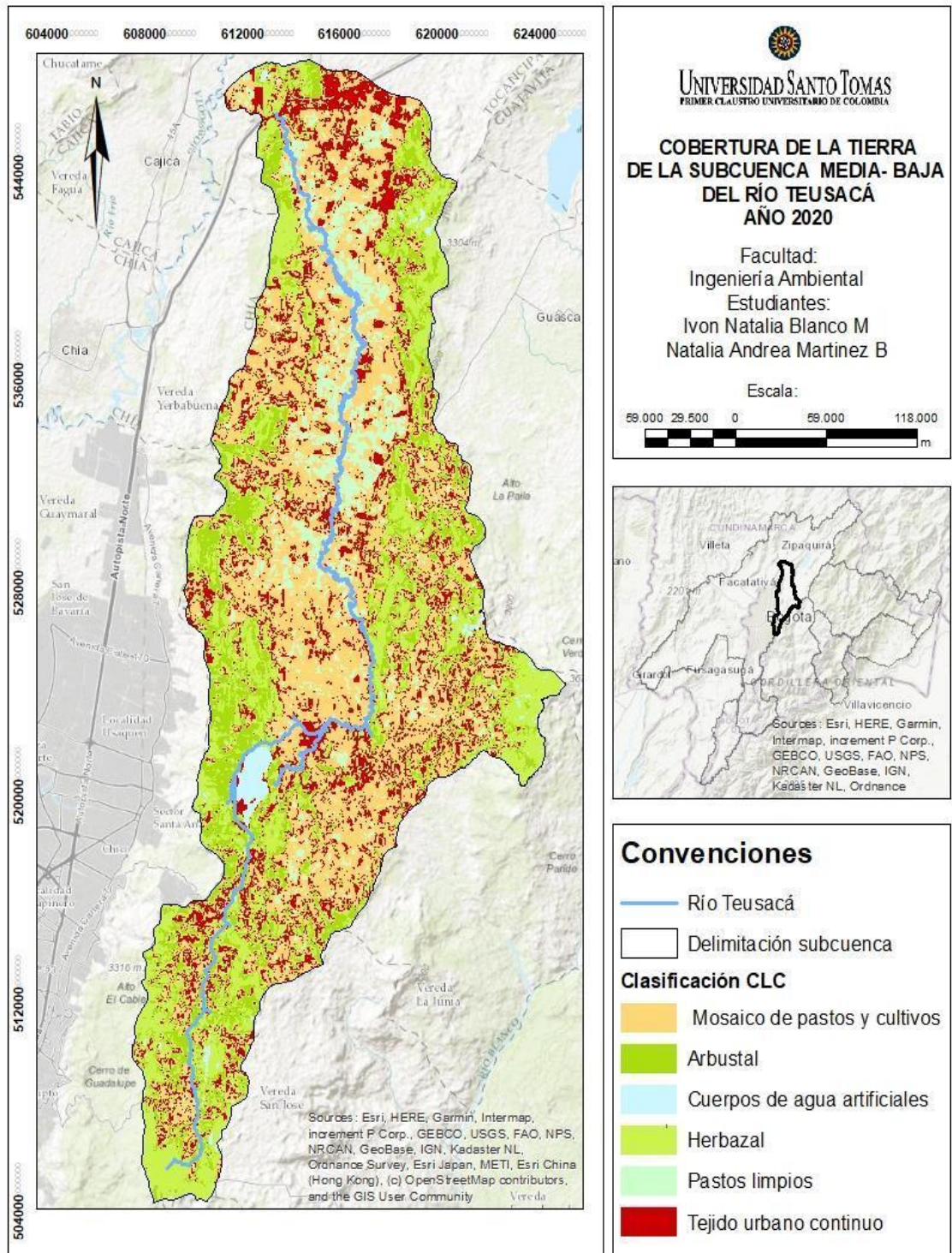
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2016.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5. Mapa de clasificación de la cobertura de la tierra de la Subcuenca del Río Teusacá, año 2020.



Fuente: Elaboración propio

ANEXO 6. Registro fotográfico de las coberturas de La Calera y Sopó

TIPOS DE COBERTURAS ENCONTRADOS	
<p>La Calera</p>  <p><i>Cobertura arbustal</i></p>	<p>Sopó</p>  <p><i>Cobertura arbustal</i></p>
 <p><i>Cobertura herbazal</i></p>	 <p><i>Cobertura herbazal</i></p>



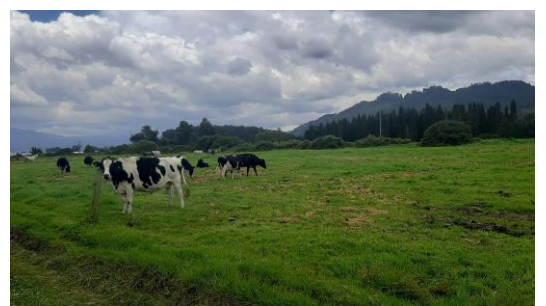
Mosaico de pastos y cultivos



Mosaico de pastos y cultivos



Pastos limpios



Pastos limpios



Tejido urbano



Tejido urbano



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7. Encuesta realizada a residentes de Sopó y La Calera

PREGUNTA	OPCIÓN DE RESPUESTA	TOTAL DE RESPUESTAS (LA CALERA)	% DE RESPUESTAS	TOTAL DE RESPUESTAS (SOPÓ)	% DE RESPUESTAS
(1) Municipio en el cuál se encuentra	La Calera	25	50%	-	-
	Sopó	-	-	25	50%
(2) ¿A que vereda pertenece?	La paz	2	4%	-	-
	La cabaña	1	2%	-	-
	El carmen	2	4%	-	-
	Centro alto	1	2%	-	-
	Hato grande	-	-	1	2%
	Aposentos	-	-	8	16%
	Chuscal	-	-	2	4%
	Bella vista	-	-	2	4%
	La Diana	--	-	2	4%
	Otro	19	38%	10	20%
(3) ¿A qué se dedica en el municipio?	Reside	7	14%	11	22%
	Trabaja	-	-	-	-

	Reside y trabaja	18	36%	14	28%
(4) ¿Hace cuánto tiempo reside o trabaja en el municipio?	0 a 3 años	-	-	1	2%
	3 a 5 años	2	4%	3	6%
	5 a 15 años	4	8%	7	14%
	Más de 15 años	19	38%	14	28%
(5) ¿Tiene usted conocimiento acerca del río Teusacá?	Si	23	46%	22	44%
	No	2	4%	3	6%
(6) Usted cree que el estado del río en términos de aprovechamiento para actividades como la agricultura, pesca, ganadería, uso doméstico, etc. actualmente es:	Bueno	2	4%	2	4%
	Regular	15	30%	19	38%
	Malo	8	16%	4	8%
(7) De acuerdo al contexto anterior, usted cree que el estado del río hace 10 años era:	Bueno	15	30%	18	36%
	Regular	10	20%	7	14%
	Malo	-	-	-	-
(8) Considera usted que la calidad de cobertura de los suelos como pastos, bosques, arbustos, entre otros, actualmente en el municipio es:	Alta	3	6%	3	6%
	Media	16	33%	17	32%
	Baja	6	12%	5	10%
(9) De acuerdo al contexto anterior, considera usted que la calidad de la cobertura de los suelos para años anteriores en el municipio es:	Alta	12	24%	20	40%
	Media	9	18%	4	8%
	Baja	4	8%	1	2%
(10) ¿Ha notado cambios notorios con respecto al estado del	Si	21	42%	23	46%
	No	4	8%	2	4%

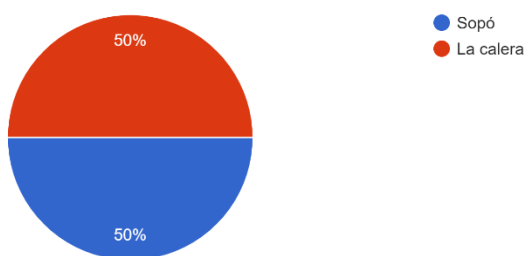
río y de la cobertura del suelo?					
----------------------------------	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 7 Gráficas resultados de la encuesta

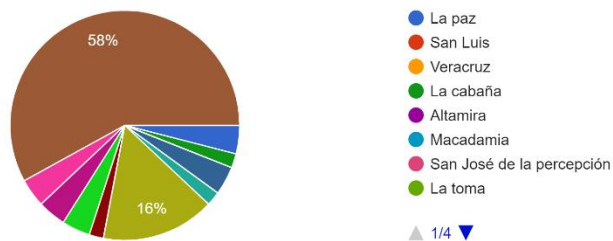
Municipio en el cuál se encuentra

50 respuestas



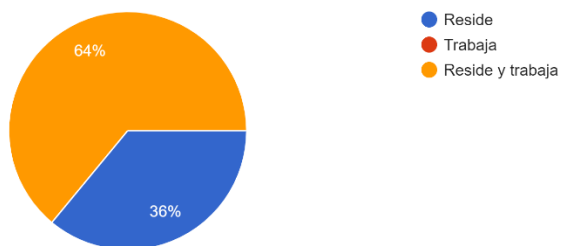
¿A que vereda pertenece?

50 respuestas



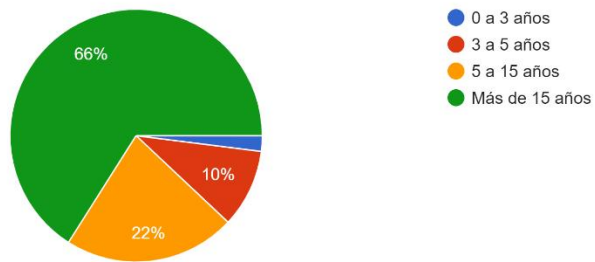
Usted en el municipio:

50 respuestas



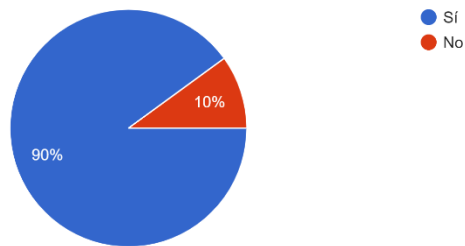
¿Hace cuanto tiempo reside o trabaja en el municipio?

50 respuestas



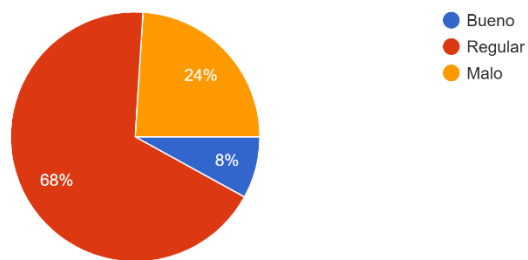
¿Tiene usted conocimiento acerca del río Teusacá?

50 respuestas



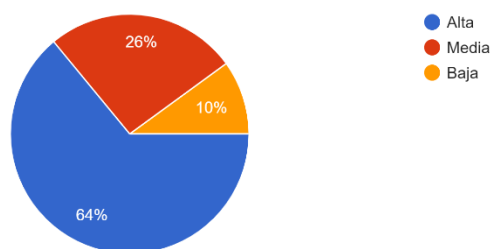
Usted cree que el estado del río en términos de aprovechamiento para actividades como la agricultura, pesca, ganadería, uso doméstico, etc. actualmente es:

50 respuestas



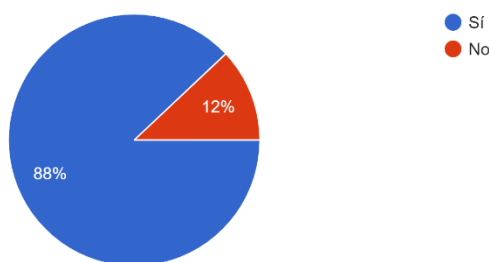
De acuerdo al contexto anterior, considera usted que la calidad de la cobertura de los suelos para años anteriores en el municipio es:

50 respuestas



¿Ha notado cambios notorios con respecto al estado del río y de la cobertura del suelo?

50 respuestas



Fuente: Google Forms

ANEXO 8 *Propuestas de los residentes de Sopó y La Calera*

No. DE ENCUESTADO	RESPUESTA
1	Crear conciencia hacia el cuidado de los recursos
2	Cómo se usa más que todo para las floristerías se podría controlar el uso del agua del río
3	Sembrar árboles
4	1. No urbanizar más 2. Cuidar los recursos
5	Cortar un poco la vegetación. Limpiar la maleza, cómo la enredadera de curuba y ayama ya que no se consume.
6	El río permanezca limpio, que sea verificado lo que le está llegando al río.
7	Educación ambiental sobre el manejo de recursos
8	Reforestación
9	Mejor manejo de aguas residuales
10	Gestión del recurso hídrico y de los usos del suelo
11	Ampliación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio para mejorar la calidad con la que se devuelve al agua al río teusacá

12	Descentralizar la urbanización del Río
13	Limpieza del río y plantar árboles
14	Dejar de construir en la cuenca del río en los humedales encima de las quebradas. Dejar de botar basura en estos sitios
15	No seguir talando árboles, cuidar las fuentes hídricas, no hacer más construcciones,
16	Siembra de árboles, mantenimiento y cuidado de los residuos, control en el verterlo de aceites y contaminantes, controlar la pesca.
17	No arrojar las basuras al río y sembrar más árboles
18	Regular las construcciones, conjuntos residenciales en cercanías al río, que tienen como desagüe el río,
19	Control de aguas residuales , control de residuos y reforestación cuencas de los ríos
20	Definitivamente creo que la reforestación sería la solución y no hacer tantos conjuntos y condominios ya que son un atentado para el ecosistema , el agua escasea cada día
21	Promover el cuidado y no botar desechos peligrosos ni contaminantes al río
22	Caudar el río
23	Sembrar árboles, y no dejar q boten basura ni ningún residuo que lo perjudique
24	No botar basuras al río ni a los bosques
25	Uso responsable del agua, elaboración de cercas vivas y árboles nativos para preservar la humedad de los suelos.
26	Tener un control adecuado de los residuos para que no terminen en el río
27	No tumbar más árboles para construir más urbanizaciones
28	Crear más conciencia sobre el cuidado del río y los bosques
29	Mejorar la planta de aguas residuales y detener la deforestación
30	Proyectos de limpieza y tratamiento continuo al río
31	Que se haga un control a las empresas que hacen vertidos al río
32	Reforestar las zonas que más cerca estén del río
33	Que no se permitan proyectos de construcción cerca del río y cause más deforestación
34	q se hagan proyectos en los colegios sobre la concientización del cuidado de los recursos, los niños son el futuro
35	No botar los residuos en donde no corresponde ya que pueden llegar al río o a los bosques y pastos
36	Tener un buen control en el uso de los fertilizantes y pesticidas en las zonas de agricultura que quedan cerca al río
37	Invertir más en proyectos para mejorar el río y los bosques en vez de urbanizaciones
38	Reciclaje en los hogares y moderar el uso del agua

39	Sembrar árboles No arrojar basuras al río
40	Que ya no sigan deforestando más, también afecta la calidad del aire y la del río
41	Multar a quienes boten residuos que contaminen el río
42	Tener conciencia que los recursos se están agotando y hay que cuidarlos con prácticas de reciclaje, limpieza y un adecuado consumo del agua
43	Actividades simples como recoger el agua de lluvias y el reciclaje en las casas pueden ayudar al cuidado de los recursos
44	Mejor control a las basuras
45	Prohibir que se construya a los alrededores del río
46	Reforestación y tratamiento al río
47	Concientizar sobre buenas prácticas para el cuidado de los recursos
48	No botar basuras al río
49	Tener en casa hábitos de reciclaje
50	Plantar más árboles

Fuente: Elaboración propia